



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE UN CHOQUE
LATERAL CON *DUMMY* CON
CINTURÓN MEDIANTE LS-DYNA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor:

D. A. ALEJANDRO CARRERO MUÑOZ

Tutora:

Dra. D^a. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

OCTUBRE 2011

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1.	OBJETIVO	11
1.2.	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	12
2	SISTEMAS DE SEGURIDAD ACTIVA	14
2.1.	FRENOS	15
2.2.	NEUMÁTICOS	17
2.3.	LUCES	17
2.4.	DIRECCIÓN	19
2.5.	<i>CONTROL DE CRUCERO ADAPTATIVO</i>	19
2.6.	CONTROL DE ESTABILIDAD	20
2.7.	CONTROL DE TRACCIÓN	22
3	SISTEMAS DE SEGURIDAD PASIVA	24
3.1.	CARROCERÍA Y HABITÁCULO DE SEGURIDAD	25
3.2.	EL FENÓMENO DE COLISIÓN	25
3.3.	ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO	26
3.4.	DEFORMACIÓN PROGRAMADA	27
3.5.	EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD	30
3.6.	EL CINTURÓN DE SEGURIDAD	32
3.7.	EL AIRBAG	34
3.8.	LOS REPOSACABEZAS	36
4	ENSAYOS DE CHOQUE	38
4.1.	HISTORIA	40
4.1.1.	HISTORIA DEL <i>DUMMY</i>	42
4.2.	ENTIDADES QUE REALIZAN LOS ENSAYOS DE CHOQUE	44
4.2.1.	ORGANISMOS DE HOMOLOGACIÓN	45
4.2.2.	FABRICANTES	45
4.2.3.	ORGANIZACIONES PRIVADAS	46
4.3.	TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE	47
4.3.1.	IMPACTO FRONTAL	47
4.3.2.	IMPACTO LATERAL	49
4.3.3.	IMPACTO TRASERO	52

4.3.4.	VUELCO	53
4.3.5.	ATROPELLOS A PEATONES.....	55
5	EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	56
5.1.	PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES DEL MEF.....	57
5.2.	PROBLEMAS NO LINEALES.....	58
5.3.	LS – DYNA	59
6	REGLAMENTO 95.....	61
6.1.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COLISIÓN.....	61
6.1.1.	TERRENO DE ENSAYO	61
6.1.2.	CONDICIONES DE ENSAYO.....	62
6.1.3.	CARACTERÍSTICAS DE LA BARRERA DEFORMABLE. ...	62
7	MODELO DE SIMULACIÓN	65
7.1.	BOGIE.....	66
7.2.	VEHÍCULO.....	70
7.3.	DUMMY	74
7.4.	CINTURÓN.....	77
8	RESULTADOS	82
8.1.	ENSAYO DE CHOQUE LATERAL CON UN DUMMY CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS.....	83
8.2.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	90
9	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	94
9.1	CONCLUSIONES	94
9.2	TRABAJOS FUTUROS.....	95
10	REFERENCIAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 Accidentes laterales por año.</i>	8
<i>Figura 1. 2 Evolución de accidentes mortales por año.</i>	9
<i>Figura 1. 3 Gravedad del accidente por año.</i>	10
<i>Figura 1. 4 Side Crash Test mediante LS-PrePost.</i>	11
<i>Figura 2. 1 Localización de los sensores del ABS y la unidad de control.</i>	16
<i>Figura 2. 2 Funcionamiento del control de crucero adaptativo.</i>	20
<i>Figura 2. 3 Efecto del ESP en condiciones de subviraje.</i>	21
<i>Figura 2. 4 Efecto del ESP en condiciones de sobreviraje.</i>	22
<i>Figura 3. 1 Larguero piramidal antes del choque.</i>	28
<i>Figura 3. 2 Larguero piramidal después del choque.</i>	28
<i>Figura 3. 3 Larguero delantero en forma de horquilla del Renault Laguna.</i>	29
<i>Figura 3. 4 Refuerzos laterales de un BMW Serie 1.</i>	31
<i>Figura 3. 5 Aceros de diferente resistencia.</i>	32
<i>Figura 3. 6 Ejemplo de cinturón de dos puntos.</i>	33
<i>Figura 3. 7 Ejemplo de cinturón de tres puntos.</i>	33
<i>Figura 3. 8 Ejemplos de airbag de conductor y acompañante.</i>	35
<i>Figura 3. 9 Airbag lateral y de cortina.</i>	36
<i>Figura 3. 10 Funcionamiento de un reposacabezas activo.</i>	37
<i>Figura 4. 1 Ensayo frontal realizado por la EuroNCAP.</i>	40
<i>Figura 4. 2 Dummy modelo "VIP-50".</i>	42
<i>Figura 4. 3 Modelos de dummy de la serie Hybrid III.</i>	44
<i>Figura 4. 4 Condiciones de un choque frontal según la EuroNCAP.</i>	48
<i>Figura 4. 5 Estado de un coche tras someterse a un choque frontal.</i>	49
<i>Figura 4. 6 Condiciones de un choque lateral según la EuroNCAP.</i>	50

<i>Figura 4. 7 Condiciones de un choque lateral contra un poste según la EuroNCAP.</i>	51
<i>Figura 4. 8 Estado del coche al sufrir un ensayo lateral contra un poste.</i>	52
<i>Figura 4. 9 Estado del coche al sufrir un ensayo por alcance.</i>	53
<i>Figura 4. 10 Vehículo lanzado sobre una rampa para provocar que de "vueltas de campana".</i>	54
<i>Figura 4. 11 Estado del coche al sufrir un ensayo por vuelco.</i>	54
<i>Figura 5. 1 Curva tensión – deformación de un material.</i>	58
<i>Figura 5. 2 Simulación de un impacto frontal con LS-DYNA.</i>	59
<i>Figura 5. 3 Modelo creado mediante LS-PrePost.</i>	60
<i>Figura 7. 1 Bogie original.</i>	66
<i>Figura 7. 2 Unión entre la parte rígida y las guías.</i>	68
<i>Figura 7. 3 Unión entre la parte rígida y la deformable.</i>	69
<i>Figura 7. 4 Bogie con impactador escalado.</i>	69
<i>Figura 7. 5 Asientos del modelo Ford Taurus.</i>	71
<i>Figura 7. 6 Modelo de Coche y asientos.</i>	72
<i>Figura 7. 7 Modelo de Coche y bogie.</i>	73
<i>Figura 7. 8 Relación adherencia/penetración de los asientos.</i>	76
<i>Figura 7. 9 Acelerómetros pertenecientes al dummy.</i>	77
<i>Figura 7. 10 Disposición geométrica de los discos del cinturón.</i>	78
<i>Figura 7. 11 Relación carga cinturón/deformación ingenieril del cinturón.</i>	79
<i>Figura 7. 12 Relación descarga cinturón/deformación ingenieril del cinturón.</i>	80
<i>Figura 7. 13 Cinturón creado para la simulación.</i>	81
<i>Figura 8. 1 Velocidad de la cabeza del dummy.</i>	88
<i>Figura 8. 2 Aceleración de la cabeza del dummy.</i>	89
<i>Figura 8. 3 Gráfica del HIC con cinturón.</i>	89
<i>Figura 8. 4 Aceleración de la cabeza del dummy sin cinturón.</i>	93

Figura 8. 5 Gráfica del HIC del dummy sin cinturón.....93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6. 1 Valoración EuroNCAP según daño craneal.....	64
Tabla 7. 1 Unidades utilizadas en el sistema.	65
Tabla 7. 2 Propiedades del material impactador.....	67
Tabla 7. 3 Valores del material Piecewise_Linear_Plasticity.....	70
Tabla 7. 4 Propiedades del material de los asientos.....	71
Tabla 7. 4 Propiedades del material de los asientos.....	71
Tabla 7. 5 Materiales dummy.....	75
Tabla 7. 6 Propiedades del material del cinturón.....	79
Tabla 8. 1 Vistas exteriores isométrica y cenital.....	83
Tabla 8. 2 Vistas interiores frontal y cenital.	86
Tabla 8. 3 Vistas isométricas comparando el caso sin cinturón y con cinturón.....	90

1 INTRODUCCIÓN

Gracias a los datos facilitados por la Dirección General de Tráfico (DGT) es fácil hacerse una idea de la cantidad de accidentes de alcance lateral que se producen, estos datos están publicados en el anuario estadístico de accidentes publicado por la DGT [1].

Si se analizan los datos facilitados se observa que en el año 2008 se producen la menor cantidad de accidentes de este tipo, mientras que es en el año 2005 donde se han producido la mayor cantidad desde que se registran este tipo de accidentes.

Sin embargo, la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo no es excesiva ya que solo varía un 10.9%. En la figura 1.1 se observan los datos recogidos en los diferentes anuarios estadísticos de accidentes.

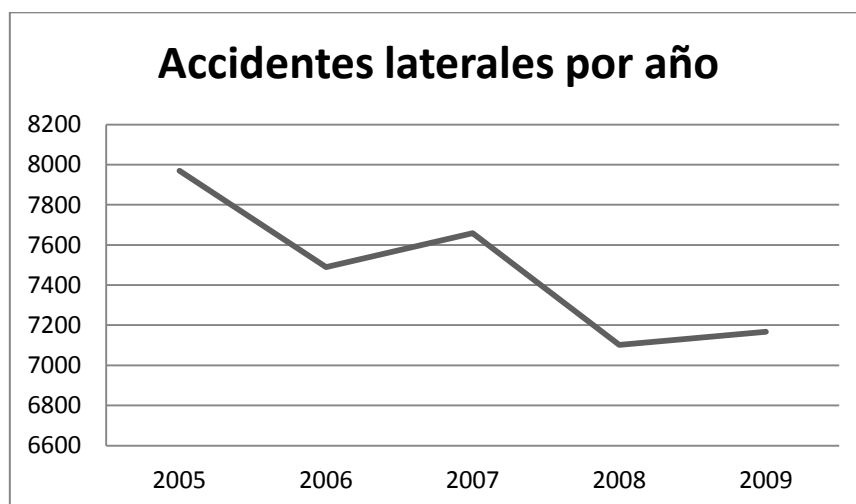


Figura 1. 1 Accidentes laterales por año.

A pesar de que la diferencia del número de accidentes producidos no es excesiva, si es reseñable el hecho de que exista una tendencia en la disminución de este tipo de accidentes, y aunque existe un repunte en el último año, no se puede concluir que esta tendencia no se mantenga hasta conocer los datos de los años posteriores.

Lo que si es necesario analizar es si el número de víctimas mortales ha aumentado o no, y en el caso de haber disminuido, saber si solo es por el menor número de accidentes o por la evolución y mejora de la seguridad pasiva de los vehículos. Para ello se analizan los datos registrados sobre la cantidad de víctimas y la gravedad de las lesiones alcanzadas.

De este análisis se observa una clara disminución en la cantidad de accidentes mortales y un aumento de la relación de heridos leves frente a los heridos graves y mortales, estas conclusiones se obtienen observando las figuras 1.2 y 1.3.

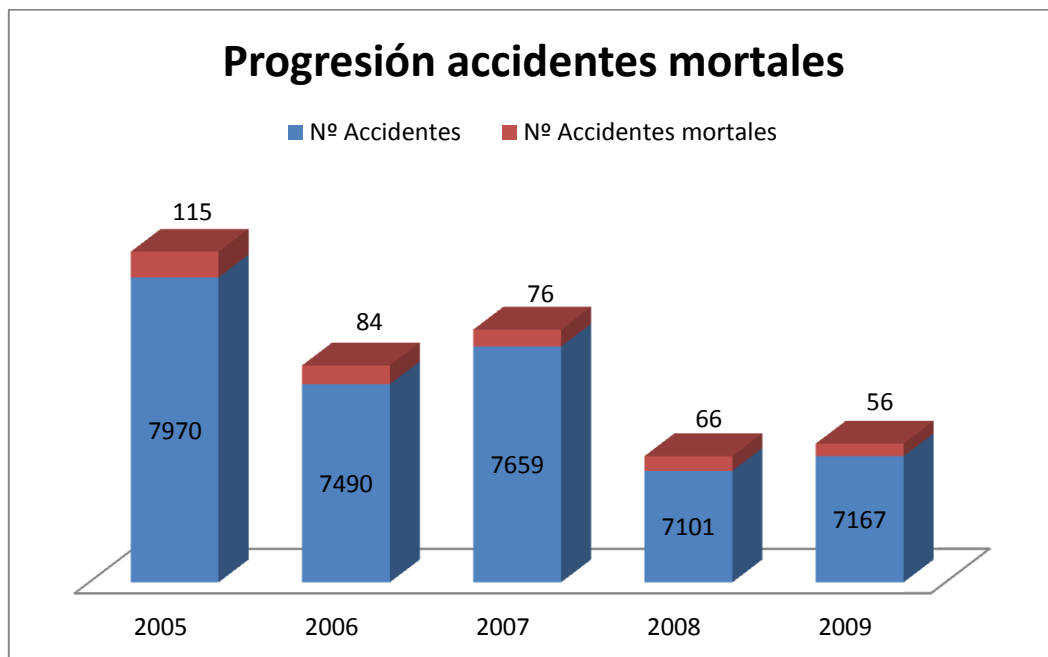


Figura 1. 2 Evolución de accidentes mortales por año.

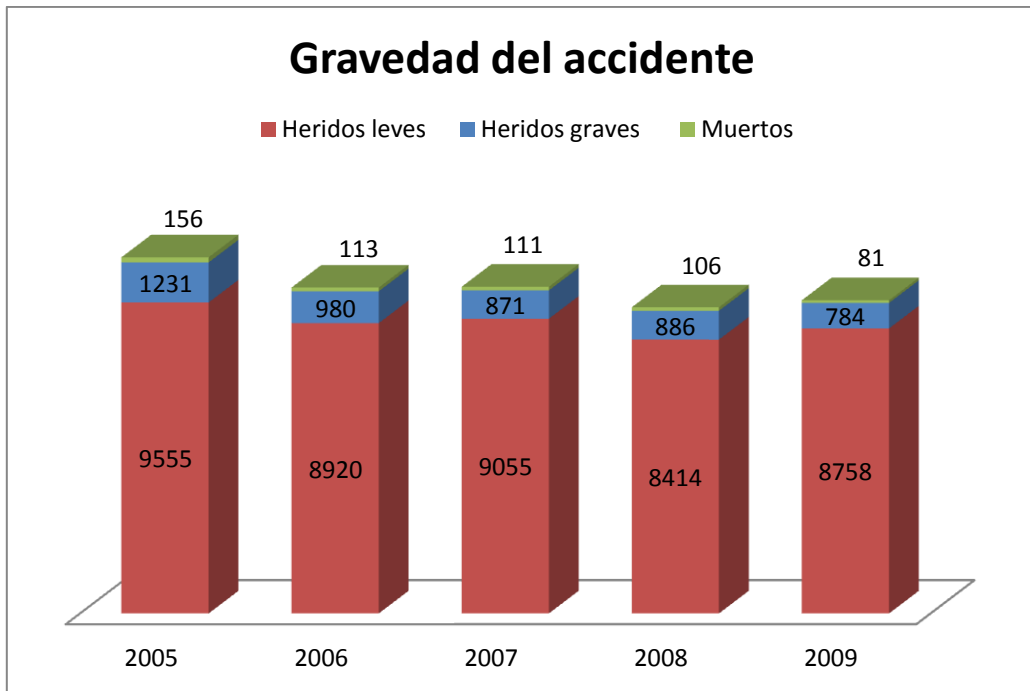


Figura 1. 3 Gravedad del accidente por año.

Para la mejora de la seguridad pasiva de los vehículos es necesaria la realización de ensayos de choque, una de las técnicas para realizar estos ensayos es la simulación de accidentes por ordenador.

La simulación de accidentes por ordenador es utilizada cada vez con mayor frecuencia en la industria del sector automovilístico, aun así, sigue siendo necesario la realización de los ensayos físicos en los propios vehículos ya que arrojan datos con mayor precisión sobre la deformación del vehículo y las lesiones que sufren sus ocupantes.

El presente proyecto se ha realizado mediante las técnicas de simulación por ordenador de este sector, donde se analiza la importancia del uso del cinturón en este tipo de accidentes de alcance lateral.

Esta simulación se ha implementado y calculado mediante el software desarrollado por la compañía *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC). La implementación del modelo y el análisis de los datos arrojados por la simulación se realizan mediante el programa LS-PrePost, mientras que la simulación del choque es realizado mediante LS-Dyna [2].

1.1. OBJETIVO

El principal propósito de este proyecto es el análisis de un modelo tridimensional de la simulación de un impacto lateral y la efectividad del cinturón de seguridad. Esta simulación se efectúa mediante el uso de herramientas informáticas.

Los parámetros implantados en el proyecto son los marcados en el Reglamento 95 para la homologación de vehículos automóviles aprobado por la Unión Europea.

Gracias al esfuerzo realizado por LTSC en el desarrollo de sus programas de simulación, se tienen dos software muy potentes y de alta complejidad, ya que estos programas tienen en cuenta una gran cantidad de parámetros y fenómenos como pueden ser los algoritmos de contacto, fricción, transferencias de calor, comportamiento no lineal, dinámica del sólido rígido, análisis térmico, etc.

Esta complejidad del programa permite que sea fácil la simulación de los casos, obteniendo un gran realismo en los resultados obtenidos, por lo tanto, en este proyecto no se tratarán con detalle ninguno de los fenómenos ni procesos que participan en la simulación.

Por último, cabe reseñar que todos los modelos empleados en la simulación han sido desarrollados por la *National Crash Analysis Center* (NCAC), los cuales se pueden obtener a través de su propia página web [3].

En la figura 1.4 se muestra una simulación mediante el uso de los programas desarrollados por LTSC.

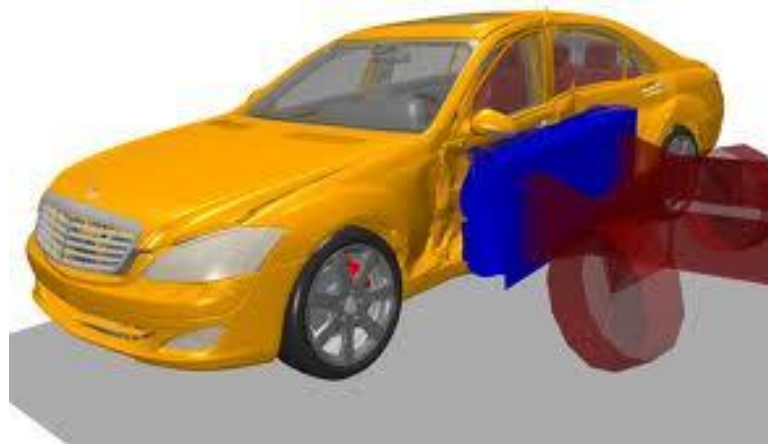


Figura 1. 4 Side Crash Test mediante LS-PrePost.

1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

A continuación se explica la estructura del proyecto y el tema que trata cada capítulo:

- Capítulo segundo. ELEMENTOS DE SEGURIDAD ACTIVA. Se analizan los distintos sistemas en materia de seguridad activa que son utilizados en el sector del automóvil. Estos sistemas son los que tratan de impedir que el accidente se produzca, destacando algunos como el ABS, el ESP, el ACC o el BAS.
- Capítulo tercero. ELEMENTOS DE SEGURIDAD PASIVA. Al igual que en el capítulo anterior, se estudian los sistemas utilizados en el sector automovilístico para minimizar los daños que puedan sufrir los ocupantes del vehículo una vez que el accidente se ha producido. Algunos de estos son el cinturón de seguridad, el airbag, o el diseño de la propia estructura del automóvil entre otros.
- Capítulo cuarto. ENSAYOS DE CHOQUE. Se exponen los distintos tipos de ensayos de choque que desde el inicio hasta la actualidad vienen siendo realizados por distintos organismos, ya sean asociaciones de consumidores, organismos homologadores o los propios fabricantes de los vehículos.
- Capítulo quinto. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. Aquí se expone en que consiste el método de los elementos finitos, el cual es el desarrollado por los programas de simulación utilizados: el LS-PrePost y el LS-Dyna.
- Capítulo sexto. REGLAMENTO 95. El Reglamento 95 es la normativa que legisla las condiciones para realizar la prueba de ensayo de choque lateral y los requisitos que debe superar un vehículo para su homologación en la Comunidad Europea.
- Capítulo séptimo. MODELO DE SIMULACIÓN. En este capítulo se expone el proceso llevado a cabo y los parámetros introducidos para poder efectuar la simulación del choque lateral entre dos vehículos mediante el programa LS-PrePost.
- Capítulo octavo. RESULTADOS. Se exponen los resultados obtenidos en la simulación del choque lateral con *dummy* con cinturón, incluyendo unas secuencias del choque simulado. También se analizan los resultados obteniendo los daños que sufre el conductor del vehículo colisionado.

- Capítulo noveno. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS. En virtud de la realización del proyecto, su implementación y los resultados obtenidos, se extraen unas conclusiones, y además se proponen una serie de trabajos futuros que se pueden llevar a cabo a partir de este proyecto y junto con otros realizados en la Universidad Carlos III de Madrid.

2 SISTEMAS DE SEGURIDAD ACTIVA

La seguridad vial trata de prevenir que los accidentes de tráfico se produzcan, o en caso de que se produzcan, el que las consecuencias y efectos sean los mínimos. De esta manera se puede dividir la seguridad vial en seguridad activa y seguridad pasiva.

La seguridad activa tiene como objetivo evitar que el accidente se produzca; se puede decir que tiene como lema la siguiente frase: El mejor accidente es el que no se produce.

Se llama seguridad activa a la propiedad del vehículo de no ser propenso a sufrir accidentes, es decir, lo más seguro posible en circulación por carretera y en cualquier circunstancia. Contribuye a dar seguridad activa al vehículo, además de todas las causas que aumentan la seguridad en marcha (suspensión, dirección, reparto de pesos, etc.), el diseño de la carrocería, en el cual se tiene muy en cuenta la visibilidad que pueda tener el conductor, procurando que los pilares que sujetan el techo sean lo más finos posible, evitándose así al máximo los llamados ángulos muertos y aumentando la superficie acristalada. Atendiendo también a la seguridad activa, los asientos se fabrican de formas adecuadas para que se adapten al cuerpo del conductor y eviten en lo posible el cansancio y fatiga del mismo, sujetándole al propio tiempo en las curvas [4].

Además, los fabricantes han puesto al alcance del conductor una serie de sistemas o elementos que le permiten controlar mejor el vehículo y evitar, en lo posible, el accidente.

Dentro de ellos, se consideran esenciales los sistemas encargados de mantener la trayectoria, estabilidad y confort del coche, además de los que le "unen" al suelo: suspensión, dirección, frenos, amortiguadores y neumáticos. Sin olvidar un sistema clave, los faros y pilotos, que nos permite ver y ser vistos.

A continuación se tratan con más amplitud algunos de estos sistemas de seguridad activa.

2.1. FRENOS

Es un sistema fundamental para la seguridad activa ya que es el encargado de detener el vehículo, por lo que siempre deben estar en buen estado. Esto se consigue mediante la transformación de la energía cinética del vehículo en calor principalmente. Los sistemas de ayuda a la frenada son los siguientes:

- **ABS:** El *Anti-lock Braking System* o sistema de frenado antibloqueo dosifica el esfuerzo de frenada adecuándolo a las condiciones de adherencia en cada una de las ruedas, obteniendo la mayor eficacia posible de los frenos. Es claro que si disminuye la fuerza de frenado, aumenta la distancia de parada, pero si no se llega nunca a bloqueo de la rueda, se conseguirá detener el vehículo de una manera estable, mientras que si aparece el bloqueo de alguna rueda, sobreviene una pérdida de control direccional, con un alto riesgo de accidente [4][5].

Dicho de otra forma, ante una frenada de emergencia, el sistema antibloqueo permite adoptar el mejor compromiso entre manejabilidad direccional y estabilidad del vehículo con la distancia de parada.

En la figura 2.1 se muestra la configuración típica de un sistema antibloqueo de frenado.



Figura 2. 1 Localización de los sensores del ABS y la unidad de control.

La manera de actuación de un sistema ABS es mediante la regulación de presión del líquido de freno sobre cada rueda del vehículo, de esta manera se asegura que la fuerza de frenado sobre cada rueda sea la mayor posible evitando el bloqueo de cada rueda de manera independiente.

- **BAS:** El *Brake Assist System* o sistema de asistencia a la frenada es una ayuda a la conducción que proporciona al sistema de frenos la mayor potencia disponible ante una frenada de emergencia. Este sistema se desactiva automáticamente cuando el conductor deja de accionar el pedal de freno, por lo que la necesidad de detener el vehículo a cesado [6].

Este sistema es una función añadida al sistema antibloqueo de frenado, por lo que puede considerarse una evolución del mismo. Es un dispositivo originalmente fabricado por TRW/Lucas que fue estrenado el Mercedes Clase S en 1996.

- **EBD:** El *Electronic Brakeforce Distribution* o reparto electrónico de frenada es una función añadida del sistema de frenos antibloqueo de cuatro canales. Este sistema distribuye la fuerza de frenado entre el eje delantero y el eje trasero. La necesidad de repartir la fuerza de frenado entre los ejes surge por la lógica transferencia de masas que se produce al decelerar y que depende, entre otras cosas, del estado de carga del vehículo.

Este sistema hace innecesario el uso de correctores mecánicos que solo conseguían acercarse a una distribución ideal de la frenada. Sin embargo, el EBD consigue casi igualarla esta distribución ideal ya que actúa activamente sobre la presión hidráulica del sistema de frenado del eje trasero [7].

2.2. NEUMÁTICOS

Es otro elemento fundamental en la seguridad activa del automóvil, ya que es el elemento encargado de transmitir todas las fuerzas al suelo, realizando la misión de propulsarlo y frenarlo, por lo que son los máximos responsables en el comportamiento dinámico del vehículo [4][8].

Un neumático en mal estado o de baja calidad no será capaz de transferir las fuerzas al suelo, por lo que el sistema de frenado perderá su efectividad y la capacidad de virar el vehículo se verá disminuida.

Para conseguir una buena efectividad de este elemento conviene que trabaje a una presión de inflado concreta. Para no descuidar este parámetro se han diseñado sistemas de control de la presión de neumáticos. De tal forma que nos indica continuamente la presión de inflado, alertando al conductor en el caso de que esta sea inadecuada para la circulación del vehículo.

La información transmitida por estos sistemas suele ser la siguiente:

- Pérdidas lentas de presión: Este tipo de pérdidas de presión es el causante de la mayoría de reventones de neumáticos. Esto es debido al aumento de temperatura que sufre el neumático por la excesiva deformación que debe sufrir por circular con una falta de presión.
- Pérdidas repentinas de presión: Suele ser producido por algún tipo de impacto o colisión contra el neumático. En este caso, el conductor es consciente de la avería debido a la dificultad en el guiado del vehículo y otras reacciones no habituales en el mismo.

2.3. LUCES

Para que un vehículo pueda circular de noche sin peligro, se hace preciso iluminar el camino por el que transita, pero en la actualidad tan necesario como esto es que los demás usuarios de la vía pública puedan ver por detrás a este vehículo. Es por estos motivos que resulta

imprescindible disponer en los automóviles un conjunto de luces anteriores y posteriores, que de otra parte están reglamentadas y tipificadas en el código de la circulación. [9]

En la actualidad están desarrollados múltiples sistemas de mejora y ayuda de la visión nocturna. Algunos de estas ayudas son los siguientes:

- **Encendido automático de las luces de posición y cruce.** Con este dispositivo se logra el encendido de las luces cuando la luz ambiental llega a ser escasa, por lo que facilita la vida a bordo del conductor al mismo tiempo que evita posible descuidos del conductor al encender el circuito de alumbrado.
- **Cambio automático al alumbrado de cruce.** Este sistema realiza el cambio de luz de carretera a cruce automáticamente al incidir sobre su célula fotoeléctrica la luz de los vehículos que circulan en sentido contrario, evitando así el deslumbramiento a los otros usuarios de la vía.
- **Faros de Xenón.** Es un sistema que sustituye a la bombilla halógena por un sistema de descarga de alta intensidad, que por medio de un arco voltaico crea una intensidad de luz mucho mayor a las bombillas tradicionales. Debido a esta mayor intensidad, es necesario el uso de un sistema de regulación automática de altura de los faros, para evitar deslumbrar a los demás usuarios de la vía.
- **Luces autoadaptables.** Sistema que orienta el haz luminoso a la izquierda, a la derecha, hacia arriba o hacia abajo según el ángulo de dirección de las ruedas, la velocidad y el movimiento del vehículo. Así se mantiene la carretera correctamente iluminada cuando la delantera del vehículo baja debido a una fuerte desaceleración, se evita que el haz se eleve cuando el vehículo acelera y, además, la luz se mantiene en la calzada, y no a un lado, al tomar curvas [6].
- **Visión nocturna.** Se trata de un sistema que va mas allá de los sistemas tradicionales de iluminación que se basan en emitir un haz luminoso allá donde se quiere ver. Estos sistemas mediante distintas tecnologías como cámaras infrarrojas o mediante el uso de radares, nos señalizan obstáculos que se encuentran en la calzada y sus inmediaciones a una distancia de hasta 500 metros [6].

2.4. DIRECCIÓN

La dirección de un automóvil permite orientar sus ruedas para hacerle seguir la trayectoria deseada por el conductor. Debe de ser precisa, no transmitir al conductor las irregularidades de la carretera y de fácil manejo [4].

Para facilitar su manejo, se ha generalizado el uso de dispositivos de asistencia al giro, son lo que se conoce como direcciones asistidas, esta asistencia en vehículos de turismo suele ser proporcionada hidráulicamente o eléctricamente.

Este sistema ha visto una evolución con la llega de la dirección de asistencia variable, la cual suministra mayor asistencia en las maniobras de aparcamiento y disminuye con el aumento de la velocidad.

Un nuevo sistema de dirección es la llamada dirección activa; esta dirección se caracteriza por permitir diferentes grados de giro para el mismo ángulo girado en el volante según la velocidad del automóvil.

2.5. CONTROL DE CRUCERO ADAPTATIVO

El Control de Velocidad de Crucero Adaptativo, también conocido como ACC que son las siglas en ingles de *Adaptive Cruise Control*, mejora la función de control de crucero normal ajustando automáticamente la distancia y la velocidad en función de la marcha del vehículo que le precede [6].

Esto se consigue con un detector de radar de gran alcance, un procesador de señales y un control longitudinal del vehículo. Si el vehículo que va delante reduce la velocidad o se detecta otro objeto, el ACC ajusta la velocidad del vehículo sin intervención del conductor. Cuando se haya despejado la carretera, el sistema volverá a acelerar el vehículo hasta la velocidad programada. Al igual que ocurre con el control de crucero normal, el conductor puede desactivar el sistema cuando lo desee. Los actuales sistemas ACC son ante todo dispositivos de confort previstos para una gama de velocidades limitada. En las figura 2.2 se muestra el funcionamiento básico de este sistema de seguridad activo.

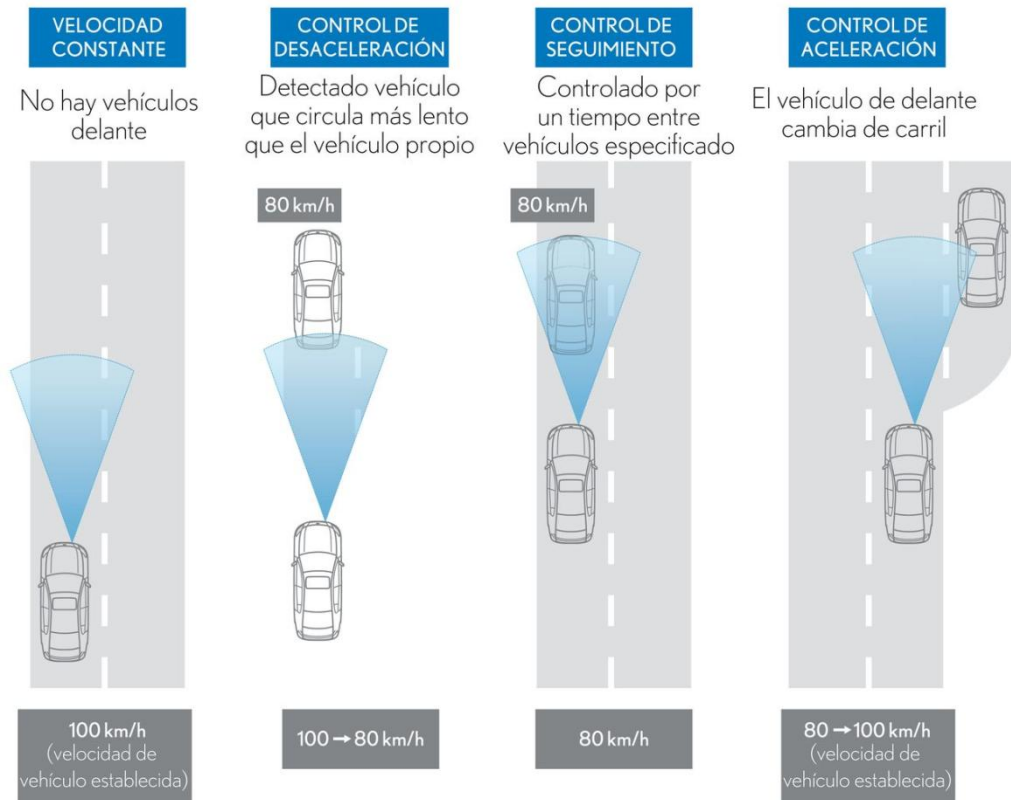


Figura 2. 2 Funcionamiento del control de crucero adaptativo.

Un ACC que funcione a cualquier velocidad resulta más seguro e incluso de manejo más cómodo. Si es preciso, el sistema desacelerará el vehículo hasta detenerlo completamente, empleando para ello toda su potencia de frenado, en lugar de desactivarse a una determinada velocidad, como ocurre en los primeros sistemas ACC.

El sistema también detecta si el coche de delante empieza a moverse de nuevo y avisa al conductor, generalmente por medio de una señal acústica. Entonces el vehículo acelera automáticamente hasta la velocidad programada, mantiene la distancia adecuada con el vehículo de delante y se adapta al ritmo del tráfico.

Este sistema resulta de vital importancia para la seguridad vial ya que puede llegar a evitar accidentes por alcance debidas a situaciones imprevistas o distracciones del propio conductor.

2.6. CONTROL DE ESTABILIDAD

El sistema de control de estabilidad, más conocido por las siglas ESP, que significa en inglés *Electronic Stability Program*, es un sistema

que ha supuesto un gran avance en la materia de seguridad activa [6][7][10].

Este sistema es llamado de distinta manera según el fabricante del automóvil, en todo caso, el objetivo es el mismo para todos ellos, este objetivo es el evitar que el vehículo pierda la trayectoria deseada cuando se producen determinadas condiciones.

No hay que olvidar que estos sistemas no permiten superar las limitaciones impuestas por las leyes de la física, por lo que las correcciones que pueda tomar el ESP se ven limitadas por la energía cinética del coche y la adherencia que dispone al suelo.

El ESP actúa en las dos situaciones posibles que se pueden dar al variar la trayectoria, el subviraje o el sobreviraje.

En las dos situaciones el ESP funciona de manera similar, analiza la información suministrada por los diferentes sensores (velocidad de cada rueda, aceleración lateral, rotación del vehículo en torno al eje vertical), compara con el ángulo girado en el volante y actúa en el caso que el coche no lleve la trayectoria marcada por el conductor.

Cuando se produce un subviraje y el coche tiende a seguir recto en una curva, el sistema de control de estabilidad compara el ángulo de giro del volante con el ángulo de giro real del vehículo, si no concuerdan, actúa sobre el freno de la rueda trasera interior, lo que corrige la desviación de la trayectoria del automóvil con el efecto de que el coche se gira de delante hacia el interior de la curva.

En la figura 2.3 se muestra el funcionamiento del ESP en el caso de sufrir subviraje.

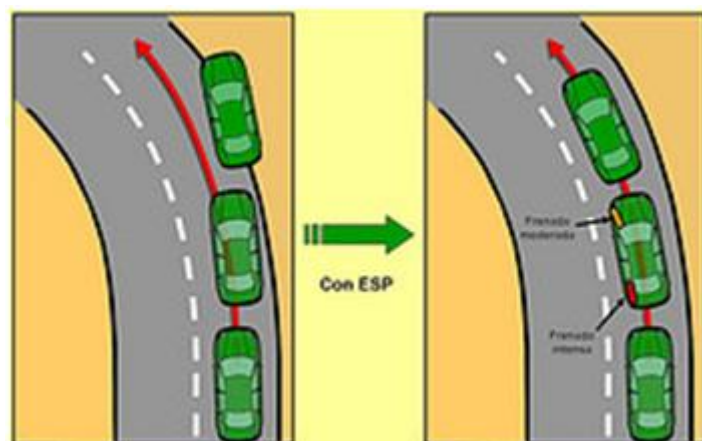


Figura 2. 3 Efecto del ESP en condiciones de subviraje.

Cuando se produce un sobreviraje o tendencia del vehículo a girar más de lo indicado por el volante, el coche se va de atrás en la curva y tiende a cerrar la trayectoria, el sistema de control de estabilidad actúa frenando la rueda delantera exterior, corrigiendo la desviación del vehículo.

En la figura 2.4 se muestra el funcionamiento del ESP en el caso de sufrir sobreviraje.

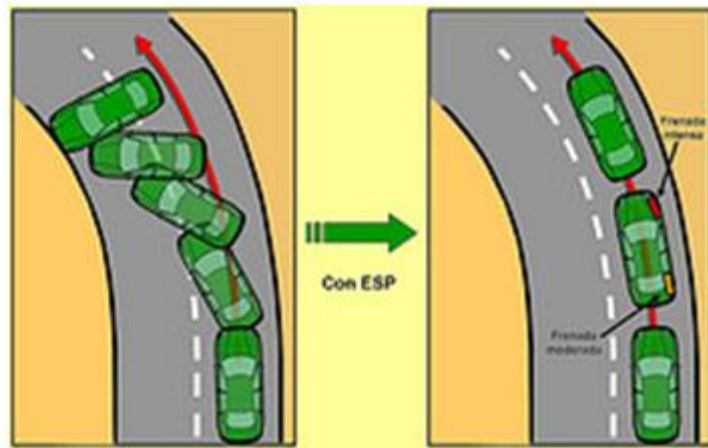


Figura 2. 4 Efecto del ESP en condiciones de sobreviraje.

Cabe reseñar que debido a las diferentes evoluciones que ha sufrido este sistema de seguridad activa, existen diferentes generaciones de ESP que pueden tomar diferentes acciones para solventar estos dos casos, pero no se van a tratar ya que no es el objetivo de este proyecto.

2.7. CONTROL DE TRACCIÓN

También es conocido con diferentes siglas dependiendo del fabricante que lo comercialice, estas suelen ser TCS (*Traction Control System*), ASR (*Accelerator Skid Control*), EDS (*Electronic Diferencial Slippery*), etc. [11].

Este sistema tiene como objetivo evitar el deslizamiento de las ruedas al sufrir el vehículo una aceleración, de esta manera se evita la pérdida de direccionalidad, aumentando la estabilidad del mismo. Este sistema debe de ser capaz de conseguir esto en todas las condiciones de adherencia posible, siempre que las leyes de la física lo permitan.

Existen dos tipos de sistemas según el grado de evolución del sistema de control de la tracción de las ruedas motrices:

- **Diferencial autoblocante electrónico.** Este tipo de control de tracción mejora la motricidad del vehículo simulando el comportamiento de un diferencial autoblocante. El sistema al detectar el deslizamiento de alguna de las ruedas motrices, actuara sobre el freno de la misma, logrando que el par del motor se dirija a la rueda que si tiene suficiente adherencia, logrando así que el vehículo inicie el movimiento.
- **Control de tracción.** Este tipo de control de tracción tiene una función añadida al sistema de diferencial autoblocante electrónico, ya que realiza la misma función en el caso de que falte adherencia en alguna de las ruedas motrices. Pero también es capaz de controlar el deslizamiento de de ambas ruedas en el caso de que las dos ruedas deslizaran. Esto lo consigue limitando la potencia que suministra el motor aunque el conductor pise a fondo.

El control de tracción, al igual que el control de estabilidad ESP, se sirve de los sensores del antibloqueo de frenos (ABS) para funcionar.

3 SISTEMAS DE SEGURIDAD PASIVA

Mediante los sistemas de seguridad activa se logran evitar multitud de accidentes, pero por desgracia esto no ocurre siempre, es aquí donde un buen diseño del vehículo en materia de seguridad pasiva puede ser determinante para salvar la vida de sus ocupantes.

La seguridad pasiva condiciona la fabricación de todos los componentes del interior del habitáculo del vehículo, de manera que en caso de accidente disminuyan los daños que se pueden ocasionar a los pasajeros, o los eviten totalmente [4].

Para aumentar esta seguridad se dispone el interior del vehículo de manera que no haya mecanismos o partes salientes, se utilizan barras de dirección partidas, cinturones de seguridad, airbag, se diseñan las cerraduras de las puertas para que en caso de accidente estas no se bloqueen, pero evitando que la puerta se abra en la colisión, etc.

A continuación se explicaran algunos de los elementos de seguridad pasiva mas reseñables en cuanto su eficacia [12].

3.1. CARROCERÍA Y HABITÁCULO DE SEGURIDAD

Actualmente la mayoría de los automóviles son del tipo de carrocería autoportante o monocasco, dejando el uso del bastidor generalmente a vehículos destinados a transporte de carga, la razón de esto se debe a que está comprobado por los ensayos de los últimos años que presentan mayor rigidez los vehículos equipados con este tipo de carrocería [4].

Esta carrocería debe de soportar y sujetar todos los elementos montados sobre ella (motor, caja de velocidades, etc.), además de tener que soportar constantes esfuerzos de flexión y torsión, aceleraciones y fuerzas aerodinámicas, etc.

Por todo esto, se hace necesario una carrocería lo suficientemente rígida para una correcta seguridad dinámica del vehículo, siendo capaz al mismo tiempo de deformarse lo máximo posible en caso de colisión para minimizar la energía transmitida a los ocupantes del vehículo.

3.2. EL FENÓMENO DE COLISIÓN

Cuando un vehículo sufre un impacto, este se compone de hasta 3 tipos de colisión; colisión primaria, colisión secundaria y colisión terciaria, las cuales se describen a continuación:

- La colisión primaria es la que sucede entre el vehículo y el objeto contra el que choca.
- La colisión secundaria es la que tiene lugar entre los ocupantes del vehículo y el interior del habitáculo.
- La colisión terciaria sucede entre los órganos internos y las paredes internas del cuerpo de los ocupantes.

Para que los ocupantes sufran las menores lesiones posibles, es lógico pensar que las colisiones secundaria y terciaria deben ser evitadas al máximo.

Estas tres colisiones se originan debido a que el vehículo antes de la colisión tiene una energía cinética, esta energía cinética depende de su velocidad (v) y su masa (m), cuyo valor se puede obtener calculándolo mediante la ecuación 3.1.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

Al colisionar el vehículo, la energía cinética desaparece, ya que la velocidad del vehículo es cero, esta energía se disipa principalmente mediante la deformación del vehículo.

La energía disipada ($E_{disipada}$) por el vehículo se puede calcular conociendo la fuerza (F) que se ejerce sobre el vehículo y la deformación (d) que sufre el vehículo, tal como indica la ecuación 3.2

$$E_{disipada} = F \cdot d \quad \text{Ecuación 3.2.}$$

Por lo tanto es fácil darse cuenta que cuanto mayor deformación sea capaz de absorber el vehículo, mayor energía será disipada por el mismo, por lo que menor deceleración sufrían los ocupantes en las colisiones terciarias.

Sin embargo, hay que tener otros parámetros presentes en el diseño de la carrocería del vehículo, ya que de nada sirve una estructura que se deforme totalmente para disipar la máxima energía si los ocupantes son aplastados. Por lo que al diseñar una estructura, esta siempre debe dejar un espacio que no se deforme, es el denominado habitáculo de seguridad.

De esta manera, los vehículos son diseñados con deformación programada, es decir, llevan zonas de absorción de impactos en la parte frontal y posterior del vehículo y así mantienen el habitáculo de seguridad sin deformar.

3.3. ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO

En la estructura de la carrocería existen partes débiles (fusibles) y partes fuertes para que la deformación se produzca progresivamente y en los lugares más adecuados a lo largo de una trayectoria bien definida y que los pasajeros queden protegidos en caso de colisión, reduciéndose así la violencia del golpe [4].

Así, las partes débiles son las encargadas de deformarse disipando la energía, estas zonas de absorción de energía se encuentran en la parte delantera y trasera del vehículo.

Como no todas las colisiones son iguales, se debe diseñar el vehículo para que estos elementos trabajen de la manera más eficaz independientemente del tipo de colisión. Para una mejor comprensión se explica a continuación el comportamiento del vehículo ante dos casos de choque distintos.

Una colisión frontal puede ser centrada o descentrada, dependiendo del lugar y superficie donde impacta el vehículo.

En una colisión frontal centrada, el choque tiene lugar parcial o en la totalidad del frontal del vehículo, por lo que la fuerza producida por el impacto se transmite a toda la superficie frontal, de manera que la deformación sufrida será menor ya que hay más cantidad de carrocería para disipar la energía, y puesto que la deformación será menor, es menos probable que la deformación afecte al habitáculo de seguridad.

En una colisión frontal descentrada, el choque solo tiene lugar en una parte lateral del frontal del vehículo, en este caso la superficie es menor, por lo que la deformación es mayor pudiendo llegar a afectar el habitáculo de seguridad, por eso se hace necesario transmitir la fuerza del choque al lado opuesto de impacto, provocando que la deformación se reparta por la carrocería y evitando así que el espacio del habitáculo de seguridad sea invadido. Esto se le conoce como deformación programada.

3.4. DEFORMACIÓN PROGRAMADA

Como ya se ha comentado anteriormente, es necesario diseñar la carrocería de manera que la deformación no se concentre en una zona, lo que se busca es que se propague a todo el chasis de manera que se repartan las deformaciones y se absorba la mayor cantidad de energía sin que se vea alterado el espacio del habitáculo de seguridad.

Para ello se utilizan diferentes elementos estructurales, de manera que se conoce, antes de que se produzca la colisión, que deformación va a sufrir el coche.

Los elementos estructurales más típicos para obtener una deformación programada son los siguientes:

- **Largueros de espesor variable.** Este tipo de elementos tienen un espesor más pequeño en la parte delantera, y va aumentando

este grosor progresivamente según se acerca al habitáculo de seguridad, suele tener una forma cónica o piramidal de manera que se favorece su autoembutición. Este tipo de elementos se deforman según la magnitud de la colisión, ya que solo se deformara la parte que se vea superada por la energía del accidente. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra un larguero piramidal antes y después de la colisión.

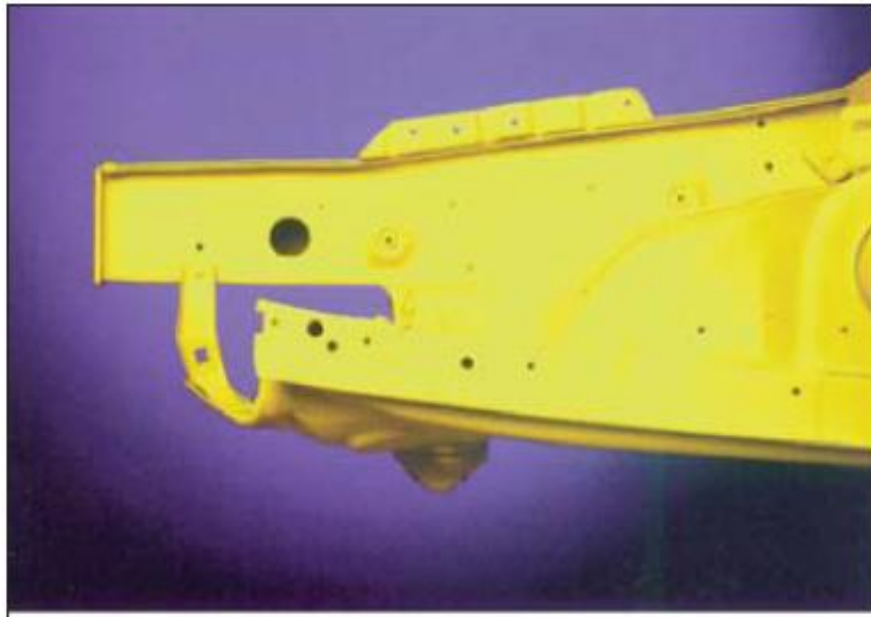


Figura 3. 1 Larguero piramidal antes del choque.



Figura 3. 2 Larguero piramidal después del choque.

- **Largueros delanteros con cuello de cisne.** Al deformarse lo hacen doblando por dicho cuello.
- **Travesaños.** Son capaces de transmitir la energía desde un larguero al otro, de esta manera, en caso de sufrir una colisión frontal descentrada, los dos largueros se deformaran.
- **Largueros delanteros en forma de horquilla.** Este elemento estructural tiene la capacidad de transmitir los esfuerzos hacia el túnel central, los estribos y la plataforma del automóvil. En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de este tipo de elemento estructural.



Figura 3. 3 Larguero delantero en forma de horquilla del Renault Laguna.

- **Puntos fusibles.** No es un elemento estructural propiamente dicho, pero si es una operación que se realiza sobre estos elementos. Se trata de zonas diseñadas para absorber la mayor energía posible mediante una deformación programada. Esta deformación programada se obtiene mediante muescas, acanaladuras, taladros o dobleces.
- **Capós con puntos fusibles.** Se diseñan este tipo de capos para que se deformen evitando así que se introduzcan en el habitáculo por el parabrisas delantero.

- **Anclajes del motor.** Estos anclajes deben de evitar que el motor invada el habitáculo de seguridad ante una colisión frontal, por lo que si esta se produce, los anclajes se desplazan hacia abajo arrastrando así el motor y todos los elementos conectados al mismo.

3.5. EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD

Una buena y sencilla definición de habitáculo de seguridad sería la siguiente: Zona de la estructura destinada a los ocupantes, diseñada de forma que garantice la seguridad pasiva necesaria para preservar la integridad de los mismos [13] [14].

Por lo tanto es fácil ver que la integridad del habitáculo de seguridad garantiza la existencia de un espacio de supervivencia mínimo donde poder refugiarse, con la ayuda de los demás sistema de seguridad pasiva, de las fuerzas desencadenadas durante el accidente.

Además, evitando la deformación del habitáculo de seguridad, se facilita el rescate de los ocupantes en caso de accidente, ya que esto facilita la apertura de las puertas.

Para lograr la efectividad del habitáculo de seguridad, comúnmente se emplean los siguientes elementos estructurales:

- **Largueros delanteros.** Dos vigas paralelas que parten del travesaño delantero. Ante un impacto se 'arrugan' para absorber la energía.
- **Largueros superiores.** Forman parte de las aletas delanteras y colaboran con los largueros delanteros en la absorción de energía.
- **Travesaño delantero.** Muy rígido, reparte las cargas para que la deformación sea uniforme en todo el vehículo.
- **Pilares.** Refuerzan lateralmente y con los largueros del techo forman el arco que configura el habitáculo.
- **Largueros traseros.** Absorben la energía en los impactos y mantienen la integridad del depósito de combustible.

- **Barras laterales.** Evitan o minimizan las consecuencias de los golpes laterales. Sustituidos a veces por puertas reforzadas. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de barras laterales.

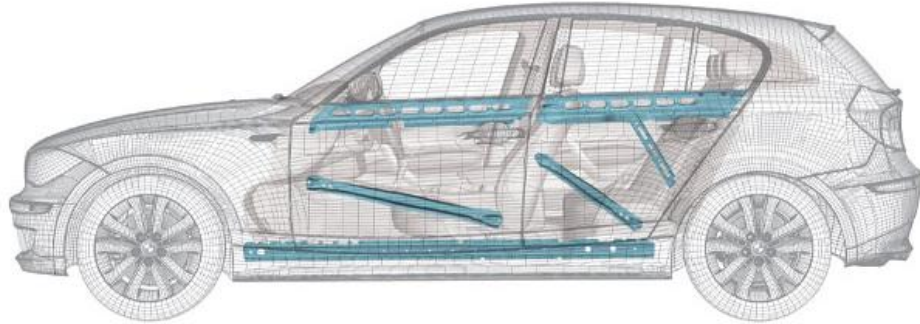


Figura 3. 4 Refuerzos laterales de un BMW Serie 1.

- **Largueros inferiores.** Situados bajo las puertas, refuerzan el habitáculo.
- **Vigueta transversal.** Proporciona rigidez al habitáculo y 'sujeta' el parabrisas y los airbags delanteros.
- **Techo.** Preserva el espacio de seguridad en caso de vuelco. Una serie de 'nervios' le aportan mayor rigidez.
- **Aceros de distinta resistencia.** Se emplean aceros de más alta resistencia en los elementos que componen el habitáculo de seguridad. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de donde se sitúan estos aceros.

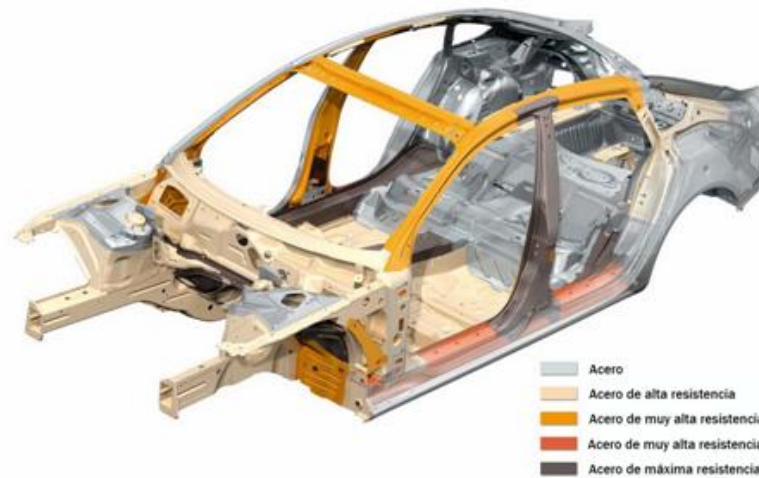


Figura 3. 5 Aceros de diferente resistencia.

- **Pedales retráctiles.** De igual manera que la columna de dirección, los pedales se diseñan para que se deforme de manera que no atrapen las piernas del conductor.
- **Lunas delanteras.** Son laminadas y templadas para evitar que en la rotura del cristal, los trozos de cristal se proyecten sobre los ocupantes.
- **Columnas de dirección no rígida.** Mediante columnas telescópicas, columnas fabricadas en varios tramos o simplemente dotadas de elementos fusibles se evita que en una colisión esta columna se incruste contra el conductor.

3.6. EL CINTURÓN DE SEGURIDAD

Se trata del elemento de seguridad pasiva que más ha influido a la hora de salvar vidas, ya que es el más eficaz. Su función consiste en sujetar el cuerpo del ocupante, evitando así que salga despedido o impacte contra las paredes del habitáculo, por lo que su objetivo es evitar la colisión secundaria [15].

Este elemento empezó a utilizarse en los automóviles en la década de 1950, previamente ya estaba siendo utilizado en aeronaves.

Este elemento de seguridad pasiva ha sufrido diferentes evoluciones y avances, los primeros diseños poseían únicamente dos puntos de

anclaje, donde se aseguraba la cadera. Este diseño era peligroso ya que podía producir lesiones en la espina lumbar, con la consiguiente parálisis. Pronto se cambió este diseño por otro que aseguraba el tronco superior, con ello se evitaban las lesiones en la espina lumbar, pero seguía sin ser lo bastante seguro, ya que el cuerpo se podía deslizar bajo el cinturón. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de cinturón de dos puntos.



Figura 3. 6 Ejemplo de cinturón de dos puntos.

La siguiente evolución en el cinturón de seguridad fue el uso de cinturones con tres puntos de anclaje, fue patentado en 1959 por el ingeniero Nils Bohlin que trabajaba para la marca de automóviles Volvo. Este cinturón era una combinación de los dos anteriores, y aseguraba tanto el tronco superior como la cadera. Actualmente es el cinturón empleado en todos los vehículos, salvo en algunos automóviles exclusivos con pretensiones deportivas que montan cinturones de 4 puntos. En la figura 3.7 se muestra el esquema de sujeción del cinturón de 3 puntos.



Figura 3. 7 Ejemplo de cinturón de tres puntos.

En la actualidad se instalan dispositivos que aumentan la efectividad del cinturón de seguridad, como el carrete inercial, los pretensores y los limitadores de esfuerzo o tensión, los cuales se explican a continuación:

- **Carrete inercial.** Trata constantemente de recoger el cinturón enrollándolo, lo que asegura que el cinturón este pegado al cuerpo y tensado para asegurar una mejor adaptación al cuerpo ante un impacto. El carrete permite desenrollar el cinturón si se hace de una manera controlada, pero ante un movimiento brusco o violento, tal y como se produce ante un accidente, el carrete se bloquea y no permite que se desenrolle el cinturón, por lo que retiene al ocupante [12].
- **Los pretensores.** Actúan solo cuando se produce el accidente, pueden ser de carácter pirotécnico o mecánico, suelen ir instalados en el segundo punto de anclaje del cinturón. Cuando el sensor detecta una colisión, manda una señal para que se active el pretensor, de tal manera que este se activa y tensa el cinturón al cuerpo, logrando una mayor sujeción [12].
- **El limitador de esfuerzo.** Solo actúa si la tensión alcanzada en el cinturón supera el valor de diseño, suele estar colocado en el primer punto de anclaje del cinturón. El limitador de esfuerzo o tensión actúa para evitar que se ejerza demasiada presión sobre el torso, evitando así posibles lesiones como la rotura de una costilla [12].

3.7. EL AIRBAG

Este sistema de seguridad pasiva viene a complementar la función del cinturón de seguridad, se activa cuando se produce una colisión, llenándose una bolsa de nylon con aire, llegando así a evitar la colisión del cuerpo contra la pared interna del habitáculo [16].

El airbag se compone principalmente de tres elementos:

- Sensores que detectan el impacto.
- Detonadores para crear el gas que rellanara la bolsa.
- Bolsa de nylon.

El sistema del airbag tiene el siguiente funcionamiento, al producirse un impacto, se produce una deceleración que los sensores son capaces de detectar, estos sensores envían una señal al detonador que al

activarse produce una explosión de los componentes químicos que lleva en su interior, esta explosión provoca una cantidad de gas lo suficientemente rápido (apenas decimas de segundo) para llenar la bolsa de nylon y evitar así la colisión del ocupante contra el habitáculo.

Poco a poco, se ha ido generalizando el uso del airbag en el automóvil, los primeros solo se situaban en el volante del conductor, posteriormente paso a montarse también en el salpicadero frente al copiloto, actualmente se instalan en multitud de zonas del vehículo, algunos de ellos son los siguientes:

- **Airbag frontal.** Son el primer tipo de airbag que se empezó a instalar, primero para el conductor, posteriormente para el copiloto, evitan el impacto de cuerpo contra el volante y salpicadero (ver figura 3.8).



Figura 3. 8 Ejemplos de airbag de conductor y acompañante.

- **Airbag lateral.** Protegen el tórax del ocupante frente una colisión lateral, van montados en el interior del asiento.
- **Airbag de cortina.** Protegen la cabeza ante un impacto lateral, van montados en el techo del automóvil (ver figura 3.9).



Figura 3. 9 Airbag lateral y de cortina.

- **Airbag de rodillas.** Protegen del impacto contra el salpicadero de esta zona del cuerpo. Suelen montarse en bajo la columna de dirección.

El rendimiento y funcionamiento del airbag se ve comprometido con el uso del cinturón, es decir, el airbag es un complemento al cinturón de seguridad y no un sustituto del mismo.

3.8. LOS REPOSACABEZAS

Aunque su nombre puede ocasionar confusión, no se trata de un elemento de confort sino de seguridad pasiva, sería más correcto llamarlo sistema de retención de la cabeza.

Su función es evitar o minimizar las lesiones cervicales debidos a las fuertes aceleraciones que se sufren por un impacto, con mayores consecuencias si este es por impacto posterior.

Al producirse el impacto, el respaldo del asiento empuja al torso del ocupante hacia delante, mientras tanto la cabeza permanece en su situación inicial debido a su inercia y esto provoca la retracción del cuello, es decir, que el cuello se doble en forma de S, lo que tiene un efecto muy desfavorable para la columna vertebral y puede ocasionar lesiones en las cervicales y en los nervios y tejidos adyacentes.

Para evitar estas lesiones, es fundamental la correcta regulación del apoyacabezas, además, para aumentar la efectividad del mismo, se han

desarrollado sistemas de funcionamiento similar a los pretensores del cinturón [12].

Al producirse una colisión frontal o por alcance se activa el sistema que provoca el desplazamiento de los reposacabezas hacia delante y arriba, provocando que el movimiento de la cabeza sea menor, este sistema es conocido con el nombre de reposacabezas activos. En la figura 3.10 se muestra el funcionamiento de un reposacabezas activo.



Figura 3. 10 Funcionamiento de un reposacabezas activo.

4 ENSAYOS DE CHOQUE

Estas pruebas realizadas en los vehículos, vienen siendo ejecutadas desde hace varias décadas, ya fuera por los propios fabricantes de vehículos en el final del diseño del vehículo o por los organismos/entidades de homologación, ya que estos vehículos debían superar unos determinados requisitos de seguridad para que la comercialización del vehículo fuese posible [14] [17].

El gran desarrollo de la informática tanto de hardware como de software de elementos finitos ha permitido desarrollar nuevas técnicas de cálculo, siendo muy habitual el uso de este tipo de programas de ingeniería asistida por ordenador, con unos tiempos de cálculo y una fidelidad en los resultados bastante óptimos. Este hecho ha provocado su empleo para el avance y desarrollo de seguridad pasiva en la estructura del vehículo.

Sin embargo, sigue siendo necesario comprobar físicamente los resultados de las innovaciones y desarrollos implantados en el chasis, por lo que los vehículos se someten a los llamados *crash-test* o ensayos de choque (crear accidentes que simulen lo más fielmente accidentes reales en un laboratorio, y con la posibilidad de simular o repetir el ensayo con las mismas características las veces que sea necesario) para poder evaluar de esta manera la reacción del vehículo en el accidente y conocer los posibles daños que sufrirán los ocupantes del mismo.

Este tipo de ensayos se llevan realizando desde hace décadas. Estas pruebas comenzaron por la proliferación y generalización del vehículo en la sociedad, lo que conllevó a un aumento considerable en el número de

muertos. Estos primeros ensayos se realizaban utilizando cadáveres o animales como ocupantes del vehículo, ya que no existían modelos que simularan la reacción del cuerpo humano ante el choque. Con el paso del tiempo, se fueron desarrollando modelos o *dummies* los cuales fueron incorporando en cada nuevo desarrollo nuevos sensores captadores de las deceleraciones y fuerzas sufridas por el choque.

El *dummy* utilizado en la actualidad es una actualización del conocido como *Hybrid III*. El *Hybrid III* fue creado en 1976, y posee cuarenta y cuatro canales de lectura de datos distribuidos por todo su cuerpo, estos sensores llegan a registrar entre 30 000 y 35 000 datos durante la duración del choque típico que suele durar entre 100 y 150 milisegundos.

Los ensayos de choque simulados en la actualidad vienen realizándose con diferentes modelos de *dummies* que simulan la ocupación de una familia:

- *Dummy* masculino (existen dos tallas).
- *Dummy* femenino.
- *Dummy* infantil (de unos 6 años de edad).
- *Dummy* infantil (de unos 3 años de edad).

Actualmente, estos *crash test* también son realizados por distintas asociaciones, siendo las de más repercusión a nivel europeo el *European New Car Assessment Programme* (EuroNCAP) y a nivel norteamericano la *National Highway Transportation Safety Administration* (NHTSA).

Estas asociaciones ponen en conocimiento de los usuarios de los vehículos, el resultado de la prueba de choque, quedando de manifiesto la seguridad de los distintos modelos comercializados (aunque todos ellos han pasado las pruebas exigidas para la homologación), esto puede afectar (y con seguridad lo hace) en las ventas de los vehículos. Esto ha provocado que cada vez más, los fabricantes se esfuercen en mejorar y estar a la vanguardia en la seguridad activa y pasiva de los vehículos, lo que ha provocado un avance exponencial en lo que se refiere a la seguridad en los vehículos. En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de un ensayo de choque realizado por la EuroNCAP.



Figura 4. 1 Ensayo frontal realizado por la EuroNCAP.

4.1. HISTORIA

En la actualidad resulta inimaginable pensar que un vehículo se pueda poner en venta sin pasar unos controles de seguridad tanto para los ocupantes del vehículo, como para los usuarios de la vía pública, pero esto no ha ocurrido siempre, y aunque los ensayos de choque se llevan realizando desde comienzos de 1940 por parte de los fabricantes, fue en 1974 cuando se estableció una legislación para que cualquier vehículo que se quisiera poner en el mercado, debiera pasar unos controles de seguridad y superar una prueba de choque para conseguir la homologación [18].

La prueba de choque consistía en lanzar el vehículo contra una pared a una velocidad de 50 km/h, los requisitos que debía superar el vehículo no tienen nada que ver con los actuales.

Ya que estos requisitos no eran suficientes, distintos grupos y asociaciones automovilísticas decidieron realizar sus propias pruebas de choque y así tener unos ensayos independientes donde los resultados de los mismos no estuvieran manipulados por los propios fabricantes, por lo que podrían ver la seguridad real de los vehículos en caso de impacto.

Según la legislación europea de aquellos tiempos, la prueba que debían superar los vehículos para su homologación se realizaba contra un bloque rígido, se pretendía comprobar la medida de intrusión de la caña de dirección en el habitáculo, pero estas pruebas nunca se realizaron con

el uso de ningún tipo de maniquí. Tampoco se controlaba el daño producido frente a un impacto lateral o la protección de los peatones frente atropellos.

Fue en 1971 cuando se utilizaron, por primera vez, maniqués o *dummies* de distintos tamaños que representaban distintas complejiones y edades de personas, de esta manera consiguieron evaluar, de una manera más o menos certera, el daño sufrido cuantitativamente y cualitativamente por una persona ante un impacto de similares características.

Las primeras pruebas de vehículos realizadas por las asociaciones sucedieron en 1988 sobre 6 utilitarios, a partir de este año estas pruebas han ido en ascenso.

Fue en 1995 cuando, con la ayuda de las asociaciones de automovilistas, los legisladores empezaron a elaborar la nueva normativa que fue finalmente establecida en 1998. En esta normativa se añade una prueba de choque lateral contra una barrera a una altura de 0.3 metros.

En el año 1997 se formó la *European New Car Assessment Programme*, más conocida como EuroNCAP, esta asociación tiene como objetivo realizar pruebas de choque sobre vehículos ya comercializados, es decir, sobre la versión final del vehículo al que acceden los compradores y no sobre los prototipos de los fabricantes, los cuales podían estar modificados para obtener unos resultados más favorables. Estas pruebas realizadas por la EuroNCAP eran publicadas, informando a los compradores, y como consecuencia secundaria ha provocado una competencia entre los fabricantes para ofrecer un vehículo más seguro y conseguir una mejor imagen de marca.

En el año 2000 se establecen dos nuevas pruebas, la prueba de choque lateral contra un poste y la prueba de ensayos con sillitas de retención infantil.

En el año 2005 entró en vigor la prueba de choque frente a la protección de peatones en caso de atropello.

Recientemente se ha empezado a realizar un nuevo tipo de choque con el fin de demostrar el grado de avance de la seguridad en los vehículos a lo largo del tiempo, para ello, se realiza un choque frontal entre dos vehículos con dos décadas de diferencia entre ellos, y así observar los daños sufridos en cada vehículo y valorar los avances técnicos conseguidos en el paso del tiempo por los fabricantes.

4.1.1. HISTORIA DEL *DUMMY*

Hasta que no se empezó a usar el *dummy* en los *crash test*, solo se obtenían datos del vehículo ante un choque, pero en ningún caso del comportamiento o daños que podía sufrir un cuerpo humano en dicho choque [19].

Los primeros *dummies* que se usaron fueron cadáveres y animales. Fue por la construcción de un simulador de asientos eyectables y arneses de seguridad para pilotos de aviones. Este proyecto fue llevado a cabo por la empresa "Sierra" junto con el laboratorio "Alderson" en el año 1949. El nombre del maniquí era "Sierra Sam".

Para principios de la década de 1950 esta misma empresa junto con los laboratorios Grumman construyeron el primer *dummy* usado para las pruebas de choque de automóviles y aviones.

Más tarde, el laboratorio Anderson produjo la serie "VIP-50" (construida principalmente para GM y FORD), Sierra respondió con un nuevo *dummy*, el "Sierra Stan", sin embargo, GM decidió que ninguno de estos dos *dummies* cumplían con los requisitos que iban buscando, por lo que el propio departamento de ingenieros de GM desarrollaron su propio *dummy* uniendo las mejores características de los *dummies* "VIP-50" y "Sierra Stan", naciendo así, en 1971 el *Hybrid I*. En la figura 4.2 se observa el *dummy* modelo "VIP-50" desarrollado por el laboratorio Anderson.



Figura 4. 2 Dummy modelo "VIP-50".

El *Hybrid I* simulaba a un humano masculino promedio en cuanto a masa, altura y proporciones, es decir, era un *dummy* percentil 50, nótese que esto era un gran paso hacia delante respecto el primer *dummy*, el "Sierra Sam" era un percentil 95, es decir, era más pesado y más grande que el 95% de los hombres.

A partir del *Hybrid I*, se ha llevado a cabo un alto desarrollo y optimización en la búsqueda del *dummy* más completo. En 1972 se creó el *Hybrid II*, este poseía rodillas, hombros, y columna vertebral, con lo que daba una respuesta más fidedigna, siendo este maniquí el primero en cumplir los requisitos norteamericanos para ensayos de cinturones de seguridad.

A pesar de que con el desarrollo de estos *dummies* se consiguió un gran salto respecto a las pruebas con cadáveres, estos *dummies* solo eran validos para prueba de diseños de cinturones de seguridad, por lo que, en la búsqueda de reducción de daños a los ocupantes, los ingenieros de GM desarrollaron, en 1976, la nueva generación de *dummies*, el *Hybrid III*.

La serie *Hybrid III* está compuesta de varios modelos/tallas representativas de la sociedad:

- *Hybrid III* masculino percentil 50: masa 77kg y altura de 168cm.
- *Hybrid III* masculino percentil 95: masa de 100kg y altura de 188cm.
- *Hybrid III* femenino percentil 50: masa de 50kg y altura de 152cm.
- *Hybrid III* infantil 6 años: 21kg.
- *Hybrid III* infantil 3 años: 15kg.

En la figura 4.3 se muestran distintos tipos de *dummy* del modelo *Hybrid III*.



Figura 4. 3 Modelos de dummy de la serie Hybrid III.

La construcción de los *dummies* se realiza con diversos materiales como la goma, espuma, acero, aluminio... para simular el comportamiento mecánico del cuerpo humano ante un choque. Los *dummies* van marcados en varias zonas como la cabeza y rodillas, para ayudar en el estudio del choque al visualizar las películas en cámara lenta.

Actualmente existen *dummies* específicos para cada ensayo de choque (frontal, lateral contra una barrera, lateral contra un poste, atropello...).

4.2. ENTIDADES QUE REALIZAN LOS ENSAYOS DE CHOQUE

Estos ensayos o *crash test* son realizados únicamente por organismos o entidades muy limitadas, y cada una de estas lo realiza con un fin distinto a las otras entidades, por ello, según qué entidad realice el ensayo, lo hará con unas características u otras, por lo que suelen ser test de choque distintos, aunque en todas ellas se busca evaluar la protección y seguridad pasiva que proporciona el modelo probado.

Los ensayos de choque son principalmente realizados por los siguientes organismos:

- Organismos de homologación.
- Fabricantes.
- Organizaciones privadas.

4.2.1. ORGANISMOS DE HOMOLOGACIÓN

Se encargan de comprobar que el nuevo modelo de vehículo que se quiere comercializar cumple con los requisitos y especificaciones de la normativa vigente. Estos organismos pueden ser a nivel continental (p.e. homologación europea) o particular de cada país/estado, como es el caso de EEUU, Canadá, Australia... que aunque emplean el mismo *crash test* pueden diferir el nivel de exigencia de los requisitos a cumplir.

Estos organismos vigilan diferentes aspectos del vehículo, no solo la seguridad, por ejemplo, uno de los aspectos que se controla son las emisiones de contaminantes de los gases de escape.

Referente a la seguridad, se verifica tanto la seguridad activa (diseñada para evitar accidentes) como la seguridad pasiva (destinada a minimizar los daños una vez producido el accidente). La seguridad activa se testea con pruebas de conducción en pistas, mientras la seguridad pasiva se comprueba mediante los mencionados *crash test*, la seguridad pasiva también podría evaluarse mediante pruebas independientes de cada elemento, pero esta práctica es muy costosa en tiempo, poco practica, y quedaría la duda de cómo reaccionaría el conjunto de las piezas en el vehículo.

Las pruebas de verificación para la homologación suelen ser realizadas por diferentes centros que se dedican especialmente a estas tareas.

4.2.2. FABRICANTES

En el diseño de un vehículo existen distintas fases de diseño, referentes a los ensayos de choque, primeramente, con el uso de potentes equipos informáticos y distintos programas de simulación, se pueden realizar pruebas de choque virtuales para saber la reacción y comportamiento del vehículo. Así los elementos del vehículo que fallan o no tienen el comportamiento correcto pueden ser identificados para ser modificados. Una vez que los *crash test* virtuales dan los resultados deseados, se procede a realizar los ensayos de choque reales con modelos o prototipos del vehículo.

Estas pruebas las realizan los fabricantes, ya que sus vehículos deben superar las pruebas de homologación y deben asegurarse que sus vehículos son validos para superarlas.

4.2.3. ORGANIZACIONES PRIVADAS

Estas organizaciones suelen valorar la seguridad (entiéndase como seguridad tanto la seguridad activa como la seguridad pasiva) de los últimos modelos automotrices puestos en venta en el mercado, de hecho, estas organizaciones se conocen como organizaciones NCAP, acrónimo de *New Car Assessment Programme*, que traducido al castellano significa Programa de Valoración de Automóviles Nuevos, la más conocida es la EuroNCAP a nivel nacional y europeo.

La EuroNCAP está compuesta por varias asociaciones y organismos europeos que velan por la seguridad de más de 500 millones de personas, fue creada en 1997, y entre los muchos integrantes que la componen, los participantes españoles que destacan son la Organización de Consumidores y Usuarios (OCU), el Real Automóvil Club de España (RACE) y el Real Automóvil Club de Cataluña (RACC) [20].

Este tipo de organizaciones y en concreto la EuroNCAP facilita la información resultante de los *crash test*, y en concreto pretende informar a los clientes, consumidores y usuarios de la seguridad de los vehículos testeados, por supuesto, esta información es independiente a cualquier fabricante.

Según el resultado de las distintas pruebas de impacto a la que se somete un modelo, obtiene una calificación expresada mediante estrellas (de cero a cinco) siendo la más alta cinco estrellas. Esta calificación depende del grado de seguridad activa y pasiva que posee el vehículo y de los daños que produce el vehículo a un peatón en caso de atropello.

Hay que tener en cuenta que estas clasificaciones solo son comparables entre vehículos de la misma categoría, ya que existen factores determinantes en estas pruebas, como el peso, que puede ser un factor negativo o positivo para los resultados según la tipología del vehículo.

El impacto frontal realizado por la EuroNCAP es más exigente que la realizada por el organismo de homologación europeo, ya que la EuroNCAP lo realiza a mayor velocidad, en concreto a una velocidad de 64 km/h, y lo más importante, obtienen más información, ya que se colocan dos *dummies* infantiles en sus respectivas sillas de retención en los asientos posteriores, además de los dos *dummies* en posición de piloto y copiloto, sin embargo, la prueba de impacto lateral es similar a la exigida en la homologación europea.

Como ya se ha comentado, gracias a este tipo de organizaciones, se impulsó de alguna manera a los fabricantes a realizar vehículos cada vez más seguros, y no conformándose con la homologación. Ya que al hacerse públicos los resultados de las pruebas, si estas muestran un mal

comportamiento del vehículo ante la seguridad, produce un efecto muy negativo sobre la imagen de la marca y en definitiva en el número de ventas y para recalcar esto, comentar que las marcas con un buen resultado en estas pruebas de choque, lo anuncian como un motivo importante para la compra de su vehículo.

4.3. TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE

En la actualidad, debido al gran número de automóviles existentes en la sociedad y su uso extendido, se producen un gran número de accidentes de diferentes magnitudes y tipologías (se producen a diferentes direcciones y velocidades, contra objetos rígidos o deformables, con más o menos ocupantes...), obviamente, no es posible representar todos los tipos de accidentes en los *crash test* de laboratorio.

Ante esta imposibilidad de ensayar todos los accidentes, se han establecido unos estándares para las pruebas de choque y así poder comparar el grado de seguridad del vehículo. Los fabricantes puede llegar a realizar más de 40 tipos de pruebas de choque en las fases de diseño del vehículo, repitiéndolas tantas veces como sea necesario.

Los tipos de ensayos, se conforman según la estadística de accidentes reales, para poder comprobar la seguridad del vehículo asemejándose mejor a la vida cotidiana de los usuarios.

Las pruebas más comunes y representativas son las siguientes:

- Impacto frontal.
- Impacto lateral.
- Impacto trasero.
- Vuelcos.
- Atropellos a peatones.

4.3.1. IMPACTO FRONTAL

Los vehículos deben de superar los criterios del Reglamento 94 aprobado por el Parlamento Europeo para conseguir la homologación. Estos ensayos se realizan a una velocidad de 56 km/h si la realiza el

organismo europeo homologador, o a una velocidad de 64 km/h si es realizada por la EuroNCAP.

En esta prueba el vehículo es lanzado contra una barrera deformable que impacta sobre ella con un solape parcial, este solape es de un 40% de la anchura máxima del vehículo sin contar los retrovisores.

El ensayo realizado por la EuroNCAP a esta velocidad de 64 km/h simula un accidente entre 2 vehículos que circulan a 55 km/h, esta diferencia de velocidad de 9 km/h más se debe a que la energía es absorbida por la pared deformable contra la que impacta. Se ha decidido tomar esta velocidad de 55 km/h porque los estudios sobre accidentes entre vehículos revelan que a esta velocidad suceden una gran parte de los accidentes graves y mortales [20] [21].

En la figura 4.4 se observa las condiciones de un choque frontal según la EuroNCAP.

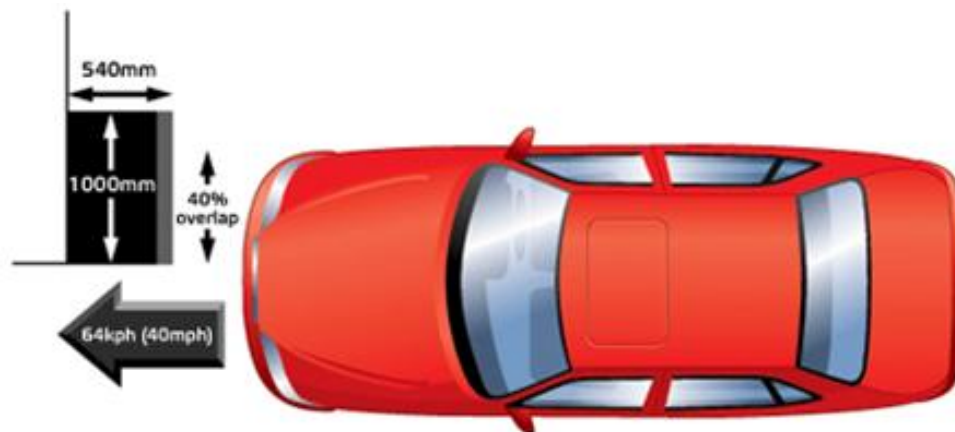


Figura 4. 4 Condiciones de un choque frontal según la EuroNCAP.

Esta prueba de choque frontal es una prueba exigente de la capacidad del vehículo para evitar la intrusión sobre el espacio del compartimento de los ocupantes, y es que el impacto producido entre ocupantes y las partes que consiguen ocupar el compartimento de los pasajeros son los causantes de las principales lesiones graves, y si el vehículo consigue evitar esta intrusión en el habitáculo de los ocupantes se minimizaran los daños además de permitir a los sistemas de retención como cinturones y airbags trabajar con eficacia al tener el espacio necesario.

En la figura 4.5 se aprecia el estado de un coche tras someterse a un choque frontal.



Figura 4. 5 Estado de un coche tras someterse a un choque frontal.

Es necesario comentar que existen intrusiones imposibles de reducir con el actual diseño de los vehículos, por poner un ejemplo, es imposible evitar el contacto entre los pies y la zona de los pies, pero se están desarrollando técnicas para reducir esta intrusión o un mayor control sobre el movimiento de los pedales. También es muy difícil evitar el contacto entre salpicadero y rodillas de los ocupantes delanteros, solo unos pocos coches lo consiguen, por eso se intenta diseñar estas zonas sin estructuras peligrosas.

Gracias a este tipo de ensayos, promovido por las organizaciones privadas, se ha fomentado el uso de pretensores en el cinturón de retención con limitadores de carga, airbags de doble fase, o evitar los contactos antes mencionados.

Una vez realizado el impacto se toman las lecturas tomadas por los *dummies* para hacer el estudio de la protección del vehículo a los ocupantes delanteros.

4.3.2. IMPACTO LATERAL

Está regulada por el Reglamento 95 aprobado por el Parlamento Europeo. Según los últimos estudios europeos, aproximadamente los daños graves o mortales producidos por este tipo de impactos asciende a

un cuarto del total, pudiendo ser cuando un coche embiste a otro en el lateral, o cuando un vehículo impacta lateralmente contra un árbol, farola o poste, por lo que se simulan dos tipos de choques laterales, el choque lateral contra un coche, y el choque lateral contra un poste.

4.3.2.1. IMPACTO LATERAL DE UN VEHÍCULO CONTRA OTRO VEHÍCULO

Este tipo de choque es el segundo más importante. El vehículo que impacta contra el lateral del otro vehículo que se pretende testear se sustituye por una barrera móvil deformable que es lanzada contra el lateral del vehículo a una velocidad de 50 km/h, tiene una anchura de 1.5 metro con una altura de 0.5 metros, siendo la profundidad deformable de 0.5 metros.

La barrera debe impactar en la puerta del conductor, se puede decir que el objetivo es que el centro de la barrera vaya a impactar contra la posición del conductor. En la figura 4.6 se describen las características de un ensayo lateral según la agencia EuroNCAP [20] [21].

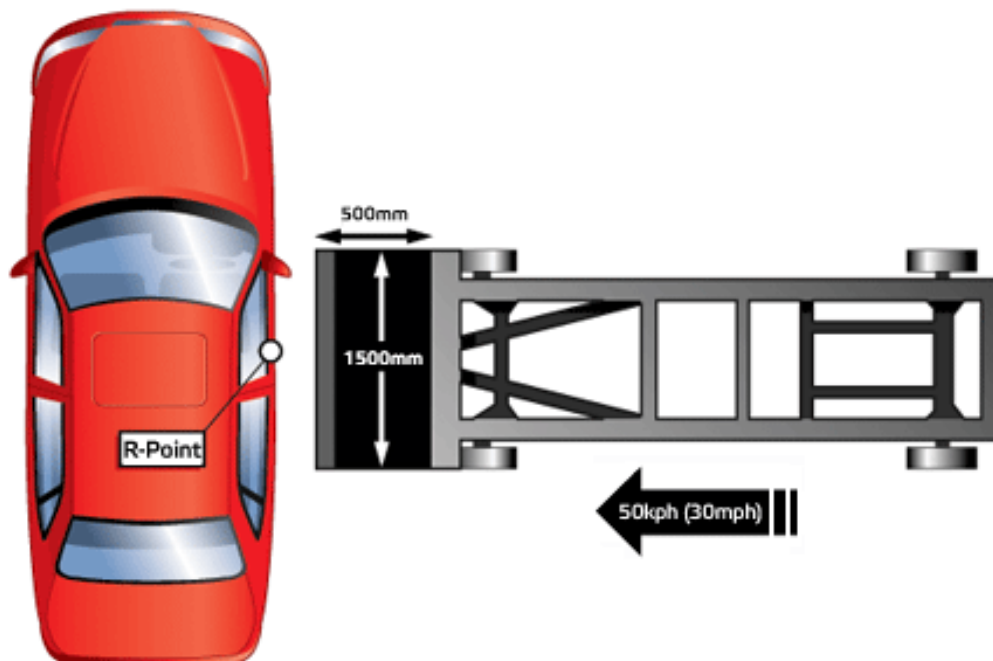


Figura 4. 6 Condiciones de un choque lateral según la EuroNCAP.

El estudio de la seguridad resulta difícil si solo se valora la intrusión sobre el habitáculo, también es muy importante como se realiza esta intrusión. Por ello, se ha generalizado la implantación de los airbags laterales.

Para este tipo de ensayos se posiciona únicamente un *dummy* en la posición del conductor.

4.3.2.2. IMPACTO LATERAL CONTRA UN POSTE

Para realizar este tipo de ensayo, se lanza el vehículo lateralmente sobre una plataforma a una velocidad de 29 km/h contra el poste, impactando en la puerta del conductor, lo más cerca de la posición de este.

El diámetro del poste debe ser de 0.254 metros, es un tamaño lo suficientemente estrecho como para producir una mayor intrusión en el habitáculo que con el anterior *crash test* lateral [20] [21].

En las siguientes figuras se puede observar las condiciones de un ensayo de choque lateral contra un poste según la agencia EuroNCAP (ver Figura 4.7) y en la siguiente figura se ve el estado de un coche al ser sometido al ensayo anterior (ver figura 4.8).

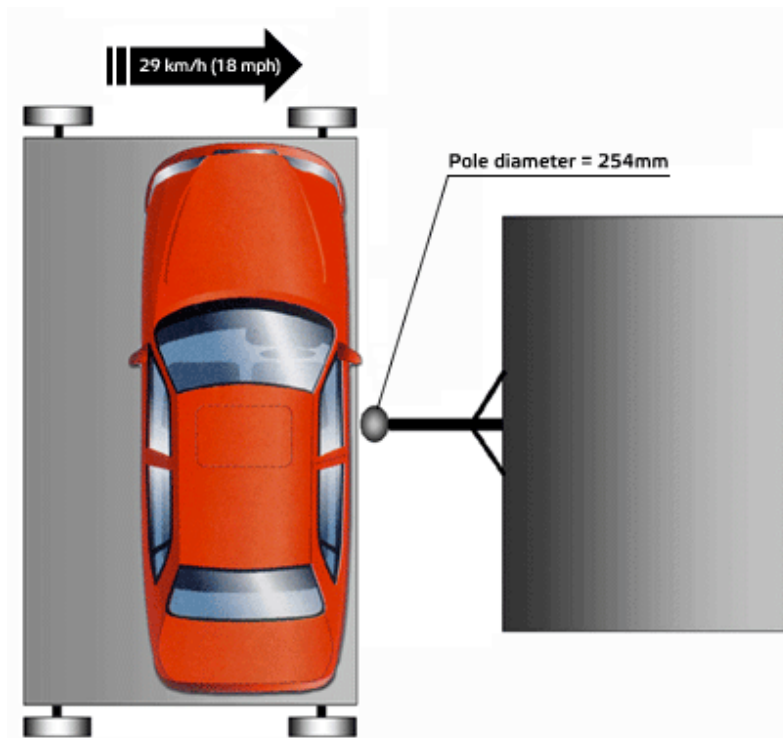


Figura 4. 7 Condiciones de un choque lateral contra un poste según la EuroNCAP.



Figura 4. 8 Estado del coche al sufrir un ensayo lateral contra un poste.

En este tipo de ensayos, tiene una gran influencia sobre la protección de los ocupantes la inclusión o no de airbags de cortina. Sin ellos, la cabeza podría llegar a impactar contra el poste con violencia suficiente para llegar a ser mortal (muchos casos llegan a un valor en el criterio de lesión cerebral de 5000, 5 veces superior al valor de referencia para una lesión cerebral grave).

En cambio, si en la prueba el vehículo posee airbag de protección para la cabeza, impide que la cabeza traspase la abertura de la ventana, obteniendo un valor en el criterio de lesión cerebral entre 100 y 300, muy por debajo del valor de referencia.

4.3.3. IMPACTO TRASERO

Esta prueba se realiza impactando una barrera a 35 km/h sobre la zona posterior del vehículo, tal como establece la normativa ECE/32/34. Para que el vehículo supere esta prueba, debe superar ciertos requisitos como por ejemplo, poder abrir las puertas, la tapa del maletero no debe introducirse en el habitáculo o no deben existir fugas de combustible [21].

En la figura 4.9 se muestra el estado de un coche tras ser sometido a un ensayo por alcance.



Figura 4. 9 Estado del coche al sufrir un ensayo por alcance.

El daño que sufren comúnmente los ocupantes en este tipo de impactos es el llamado como latigazo cervical, aun no se conocen a la perfección los mecanismos provocadores de este tipo de lesión, pero si se sabe que un diseño y ajuste adecuado de los asientos y reposacabezas influyen en la gravedad de las lesiones.

4.3.4. VUELCO

Existen dos maneras de realizar el test de vuelco, que se realizan para comprobar la rigidez del techo y los pilares que lo sustentan, no debiendo producirse deformaciones de gran magnitud para que no se reduzca el espacio para los ocupantes reduciéndose la probabilidad de sufrir graves daños [21].

La manera más habitual de realizar este ensayo consiste en 2 fases, se comienza colocando el coche en una plataforma móvil e inclinada, una vez colocado, se lanza la plataforma a una velocidad de 50 km/h hasta que se para repentinamente provocando que el vehículo salga despedido de la plataforma, y como el vehículo estaba inclinado respecto a la horizontal, se consigue que vuelque y de "vueltas de campana" que es como comúnmente se llama este tipo de movimiento del coche. En la figura 4.10 se muestra un instante del ensayo al que ha sido sometido el vehículo para conocer los resultados tras un vuelco.



Figura 4. 10 Vehículo lanzado sobre una rampa para provocar que de "vueltas de campana".

La segunda forma de realizar este *crash test* de vuelco es dejando caer el vehículo desde una altura de 0.5 m, el impacto debe recibirse sobre el pilar A del coche en el lado del conductor, es decir, en la esquina superior izquierda del parabrisas delantero. En la figura 4.11 se puede observar el estado de un vehículo tras ser sometido a un ensayo de vuelco.



Figura 4. 11 Estado del coche al sufrir un ensayo por vuelco.

En ciertas ocasiones, se hace un tipo de prueba distinta, sin provocar un choque, consiste en someter a los pilares que sustentan el techo a compresión, de esta manera, se puede comprobar la rigidez y resistencia que poseen y la deformación que sufren.

4.3.5. ATROPELLOS A PEATONES

Se realizan diferentes ensayos donde se reproducen accidentes de atropello a peatones adultos y peatones niños, son reproducidos a una velocidad de 40 km/h. Se trata de un test muy difícil para evaluar la protección de los peatones, ya que se sabe donde impactara el paragolpes contra las piernas, pero una vez producido este primer impacto, no se sabe donde impactara la cabeza del *dummy*. Por ello, muchas veces, se realizan ensayos individuales, una para la parte inferior de la pierna contra el paragolpes, otra para la parte superior de la pierna y el inicio del capó, ensayos de choques de cabeza de *dummies* de niño y adulto contra la parte final del capó [20] [21].

Gracias a este tipo de ensayos, promovido por las organizaciones privadas, se han adoptado ciertas medidas para la protección del peatón, ahora se intenta que los paragolpes se deformen al entrar en contacto con la piernas e intentando que este primer contacto no se produzca a la altura de las rodillas, sino lo más abajo y repartido posible. Para el inicio del capó se recomienda eliminar todas las partes rígidas innecesarias, e intentar que la parte alta del capó proporcione un espacio sobre las partes rígidas para evitar daños sobre la cabeza.

5 EL MÉTODO DE **LOS ELEMENTOS** **FINITOS**

Uno de los retos que debe afrontar el ingeniero en el desarrollo de sus labores es el analizar y calcular soluciones para el diseño de distintos procesos, elementos o sistemas tecnológicos, es decir, la predicción cuantitativa y cualitativa del comportamiento de estos elementos o procesos [22].

Para lograr esto, el ingeniero ha de implantar sus conocimientos de física, química y matemática en un modelo matemático, este modelo no deja de ser un sistema de ecuaciones, cuyas incógnitas representan las magnitudes necesarias para resolver el comportamiento del objeto que se diseña. Por lo que el ingeniero, para conocer el valor de las incógnitas únicamente debe de resolver dicho sistema.

Debido a la dificultad para obtener dichas soluciones, los ingenieros han resuelto históricamente estos sistemas mediante el uso de modelos simplificados basados en resultados experimentales principalmente. Este sistema ha resultado suficientemente preciso para la ingeniería, pero es fácil darse cuenta que presenta muchas limitaciones en cuanto a posibilidades de análisis, limitaciones que se ven incrementadas por las mayores exigencias de la tecnología moderna.

Afortunadamente para el cálculo ingenieril, con la evolución de la electrónica y sus métodos computacionales, han aparecido numerosas herramientas y técnicas numéricas que facilitan el cálculo de estos sistemas de ecuaciones.

Una de estas técnicas numéricas es el método de elementos finitos (MEF).

Este método se ha desarrollado ligado principalmente al cálculo de ingeniería estructural. Antes de la computación electrónica, los métodos de resolución eran iterativos, había que resolverlos manualmente y ello conllevaba un consumo de tiempo y recursos humanos muy elevado. Con la llegada del cálculo por computadora, estas operaciones se han visto reducidas en tiempo increíblemente [23].

A pesar de poder crear un modelo matemático del sistema que se quiere diseñar, en muchas ocasiones sigue siendo necesaria la creación de prototipos reales del mismo para obtener resultados con mayor grado de exactitud o que implican una gran responsabilidad.

5.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES DEL MEF

En el método de elementos finitos se pretende ir de un medio continuo a una serie de elementos unidos entre sí, los cuales se definirán como nodos. Lo importante en este caso es que los elementos sean lo suficientemente pequeños como para que su aproximación resulte aceptable.

Al aplicar el MEF, lo que se hace es pasar de un sistema de infinitos grados de libertad a un sistema con un número de grados de libertad finitos, cuyo comportamiento viene definido por un sistema de ecuaciones, las cuales pueden ser lineales o no lineales.

Es necesario distinguir en cualquier sistema a analizar el dominio, que corresponde al espacio geométrico del sistema, las condiciones de contorno que corresponde a las variables conocidas como temperatura, cargas, etc. y las variables que se desean conocer del sistema, es decir las incógnitas.

El principio básico de funcionamiento del MEF es la discretización. Este método consiste en dividir el espacio geométrico del sistema en elementos que pueden ser puntos, líneas o superficies según sea lineal, bidimensional o tridimensional.

Una vez discretizado el sistema y aplicadas las condiciones de contorno, se resuelve de forma lineal hasta alcanzar el estado final. Si durante la resolución del sistema aparece alguna ecuación no lineal, esta ha de ser resuelta gradualmente de manera lineal.

El método de elementos finitos, a pesar de tener sus limitaciones, es una herramienta de cálculo altamente potente y es capaz de simular cualquier problema físico.

Las limitaciones que presenta el MEF vienen siendo las que presenta al implementar las condiciones del modelo a calcular. Por lo que muchas veces solo es posible realizar una aproximación del modelo. Por esta razón es muy importante comparar los resultados simulados con los obtenidos mediante ensayos reales.

5.2. PROBLEMAS NO LINEALES

Como se ha explicado, el método de elementos finitos calcula las incógnitas mediante discretización con ecuaciones lineales. Esta simplificación ayuda a resolver los cálculos, pero se hace evidente que no se adapta a la realidad en cuanto al comportamiento del elemento, ya sea debido al material o a la geometría del mismo, entre otros factores [24].

Para entender mejor este detalle, solo hace falta fijarse en el comportamiento de cualquier material elástico, ya que su curva tensión – deformación es lineal hasta alcanzar su límite elástico, una vez alcanzado, la curva pasa a ser no lineal.

En la figura 5.1 se visualiza este fenómeno explicado.

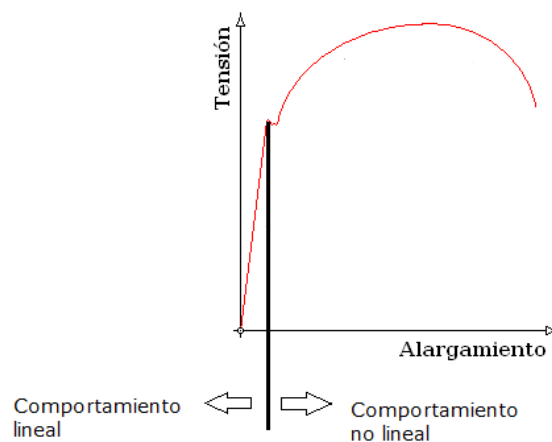


Figura 5. 1 Curva tensión – deformación de un material

Es fácil darse cuenta que en la simulación de un choque lateral, existirán multitud de parámetros y elementos que no se comportan de manera lineal durante todo el proceso de cálculo, por lo que es necesario introducir de manera correcta el comportamiento de no linealidad de estos elementos.

5.3. LS – DYNA

El software LS-Dyna está desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC). El propósito de este software de elementos finitos es simular problemas complejos reales [2].

Este programa está desarrollado para aplicaciones en la industria automovilística, aeroespacial y moldeo de metales, entre muchas otras.

LS-Dyna se basa en el DYNA3D, un programa creado en los años 70 para la simulación de armas nucleares, desarrollado por Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) [25].

Gracias al grado de desarrollo del software LS-Dyna, se pueden simular problemas no lineales mediante la integración explícita de sus ecuaciones, siendo de gran ayuda en la industria aeroespacial, militar y automovilística.

La industria automovilística ha sabido aprovechar la capacidad de este tipo de programas en la investigación del diseño del automóvil y su comportamiento en impactos, ahorrando grandes cantidades de dinero. En la figura 5.2 se muestra una simulación mediante LS-DYNA.

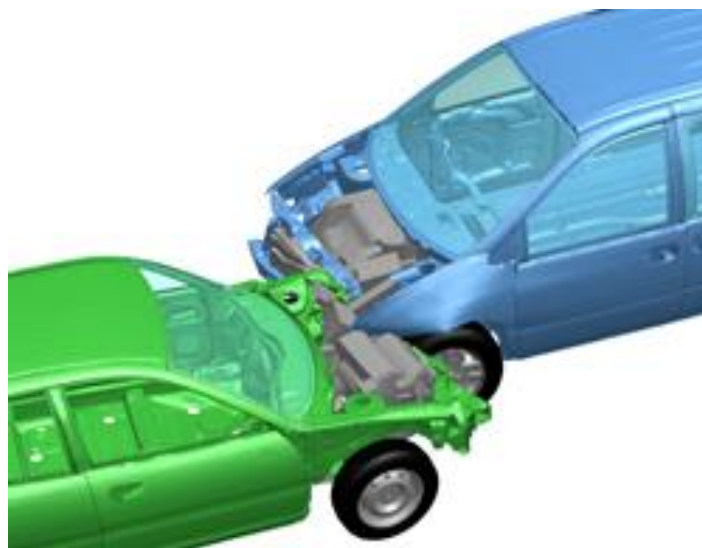


Figura 5. 2 Simulación de un impacto frontal con LS-DYNA.

Es necesario recordar que LS-Dyna se trata de un software de procesado o cálculo de integración explícita. Esto significa que es necesario un programa para crear el modelo que se quiere simular, donde introducir los datos y variables a interpretar.

Este programa necesario es por tanto un software de pre-procesado. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el LS-PrePost, también desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

El LS-PrePost es un software de pre-procesador y post-procesador, permite la creación de elementos mediante diferentes herramientas de mallado, y posee aplicaciones especiales para la simulación de airbags, *dummies*, ajuste de cinturones de seguridad, etc.

En la figura 5.3 se muestra un modelo creado mediante LS-PrePost.



Figura 5. 3 Modelo creado mediante LS-PrePost.

Una vez creado el modelo a simular, se importa al software de procesado LS-Dyna, terminada esta simulación, es necesario un programa de post-procesado, como el LS-PrePost, para visualizar e interpretar los datos obtenidos.

Con LS-PrePost se visualizan las aceleraciones y velocidades, tensiones y deformaciones, animaciones en tres dimensiones, etc. También es capaz de darnos resultados más específicos como el CSI (*Chest Severity Index*) o el HIC (*Head Injury Criterion*) que son necesarios para evaluar el nivel de daños ocasionados sobre el tórax y la cabeza, estos valores son importantes ya que los exige la normativa reguladora.

6 REGLAMENTO 95

El Reglamento 95 es la directiva vigente que regula y determina los requerimientos que se exigen en la protección de los ocupantes del vehículo en un caso de impacto lateral. Esta normativa fue aprobada el 18 de julio del 2005 por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.

Este Reglamento 95 debe aplicarse en vehículos a motor de las categorías M_1 y N_1 donde el punto más bajo del asiento se encuentre a 700mm como máximo del nivel del suelo.

El ensayo del impacto lateral se debe realizar en el lado del conductor, salvo que existan estructuras laterales asimétricas que puedan afectar al comportamiento y resultado en el caso de una colisión de este tipo, por lo que habría que realizar el ensayo en ambos lados.

6.1. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE COLISIÓN

6.1.1. TERRENO DE ENSAYO

Según el anexo 4 del Reglamento 95 se dice textualmente:

“El área de ensayo será suficientemente amplia para dar cabida al sistema de propulsión de la barrera móvil deformable, para permitir el desplazamiento del vehículo golpeado después de la colisión y para

disponer el material necesario para el ensayo. El lugar donde se produzcan la colisión y el desplazamiento debe ser horizontal, plano, sin irregularidades y representativo de una calzada normal, seca y regular”.

6.1.2. CONDICIONES DE ENSAYO

También el anexo 4 del Reglamento 95 marca las condiciones en las que se ha de desarrollar el ensayo de colisión lateral. Las principales condiciones se narran a continuación:

El vehículo a ensayar estará parado, donde la trayectoria para el impacto será la del plano medio vertical longitudinal del *bogie* perpendicular al plano medio vertical longitudinal del vehículo impactado. La velocidad del ensayo del impactador móvil será de 50 km/h. El plano horizontal y vertical medio de la barrera móvil coincidirán con el punto de referencia de la plaza sentada con una tolerancia de ± 25 mm.

La temperatura estabilizada del *dummy* debe ser de 22 ± 4 °C, en el momento del ensayo de colisión lateral.

El vehículo a ensayar debe incluir todos los equipamientos susceptibles de tener influencia sobre los resultados del ensayo, en punto muerto y con el freno de estacionamiento desactivado.

El *dummy* debe cumplir las especificaciones del anexo 6 del Reglamento 95 y se emplazará en la plaza delantera del lado a golpear, según el procedimiento descrito en el anexo 7 del presente Reglamento.

Los cinturones de seguridad deben ser homologados según el Reglamento 16 y los anclajes satisfacer las condiciones establecidas en el Reglamento 15. Obviamente el ensayo se realizara con el uso de este sistema de retención.

6.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA BARRERA DEFORMABLE.

La barrera móvil deformable debe cumplir las especificaciones establecidas en el anexo 5 del Reglamento 95. Además debe de llevar un dispositivo apropiado para evitar un segundo impacto contra el vehículo golpeado. Las características más reseñables que se indican en el anexo 5 del presente Reglamento son los siguientes:

- La masa total debe ser de 950 ± 20 kg.
- Las vías delanteras y trasera del carretón, deben ser iguales a 1500 ± 10 mm. La distancia entre ejes del carretón, debe ser de 3000 ± 10 mm.
- El impactador tendrá una anchura de 1500 ± 10 mm. y una altura de 500 ± 5 mm.
- La altura de la zona de colisión debe de situarse a 260 ± 5 mm.

6.2. CÁLCULO DEL *HIC* (*HEAD INJURY CRITERION*)

Según el anexo 4, apartado 7 del Reglamento 95 en el ensayo de colisión lateral se debe registrar diferentes lecturas, las cuales son las siguientes:

- Medidas en la cabeza del maniquí.
- Medidas en el tórax del maniquí.
- Medidas en la pelvis del maniquí.
- Medidas sobre el abdomen del maniquí.

En el desarrollo de este proyecto se han evaluado los daños producidos en la cabeza. Este daño se mide mediante el parámetro adimensional HIC (*Head Injury Criterion*).

Este parámetro solo hay que calcularlo si existe contacto de la cabeza, en el caso de existir, este parámetro debe registrar un valor igual o inferior a 1000 para poder homologar el vehículo.

El cálculo de este valor viene determinado en el anexo 4, apéndice 1 del Reglamento 95, según el cual el parámetro debe calcularse durante todo el tiempo que dure el contacto con la cabeza.

El valor del HIC depende de la aceleración resultante del centro de gravedad de la cabeza (a) en (m/s^2) dividida entre 9.81 registrada en función del tiempo y filtrado con una clase de frecuencia de 1000 Hz. También depende de los instantes donde sucede el contacto inicial y el final (t_1 y t_2):

$$(t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Para saber que daño corresponde al valor registrado por el HIC, se debe consultar el código de *Abbreviated Injury Scale*, también conocido con AIS Code [26].

Según estos valores de HIC y AIS Code, se produce una serie de daños que la EuroNCAP valora en una escala de color. La tabla 6.1 muestra esta relación.

HIC	AIS Code	Nivel de daño cerebral	Nivel de daño en el cráneo	Valoración EuroNCAP
<150	0/1	Sin conmoción	Sin fractura	Verde
150-500	1	Suave Conmoción	Sin fractura	Verde
500-1800	2/3/4/5	Conmoción Severa	500-900 Pequeña Fractura	<650 Verde
				650-767 Amarillo
			900-1800 Gran Fractura	767-883 Naranja
				883-1000 Marrón
>1800	6	Coma cerebral	Vida amenazada por la fractura	> 1000 Rojo

Tabla 6. 1 Valoración EuroNCAP según daño craneal.

7 MODELO DE SIMULACIÓN

LS-DYNA es un software de elementos finitos que no utiliza unidades. Por esta razón es de suma importancia que cada valor que se introduzca en el programa LS-PrePost sea coherente con las unidades que se han prefijado previamente [27] [28] [29].

En el presente caso se ha seguido el criterio de unidades que se muestra en la tabla 7.1.

Magnitud	Unidad
Longitud	Milímetro (mm)
Tiempo	Segundo (s)
Masa	Tonelada (t)

Tabla 7. 1 Unidades utilizadas en el sistema.

Como consecuencia, la unidad de aceleración será $\left[\frac{mm}{s^2}\right]$, la de fuerza será $\left[\frac{t \cdot mm}{s^2}\right]$ y la de tensión será $\left[\frac{t}{mm \cdot s^2}\right]$.

El sistema de coordenadas de este modelo de simulación es el siguiente:

- **Eje X:** Coincide con el la dirección y sentido de marcha del vehículo.
- **EJE Y:** Coincide con la dirección del carro impactador o bogie.
- **EJE Z:** Perpendicular al plano que definen los ejes X e Y, sentido positivo hacia arriba.

Para la realización de la simulación del impacto lateral, se comienza con unos modelos facilitados por *National Crash Analysis Center* a los que se pueden acceder y descargar desde su página web [3].

A continuación se comentará todos los pasos necesarios para el desarrollo del proyecto.

7.1. BOGIE

El modelo descargado de la página web, no cumplía la normativa vigente para el ensayo lateral, ya que el impactador o barrera deformable tenía unas medidas insuficientes a las requeridas, pues la anchura inicial del ariete era de 406 mm., y la altura de 70 mm. En la figura 7.1 se observa el bogie original descargado de la página web.

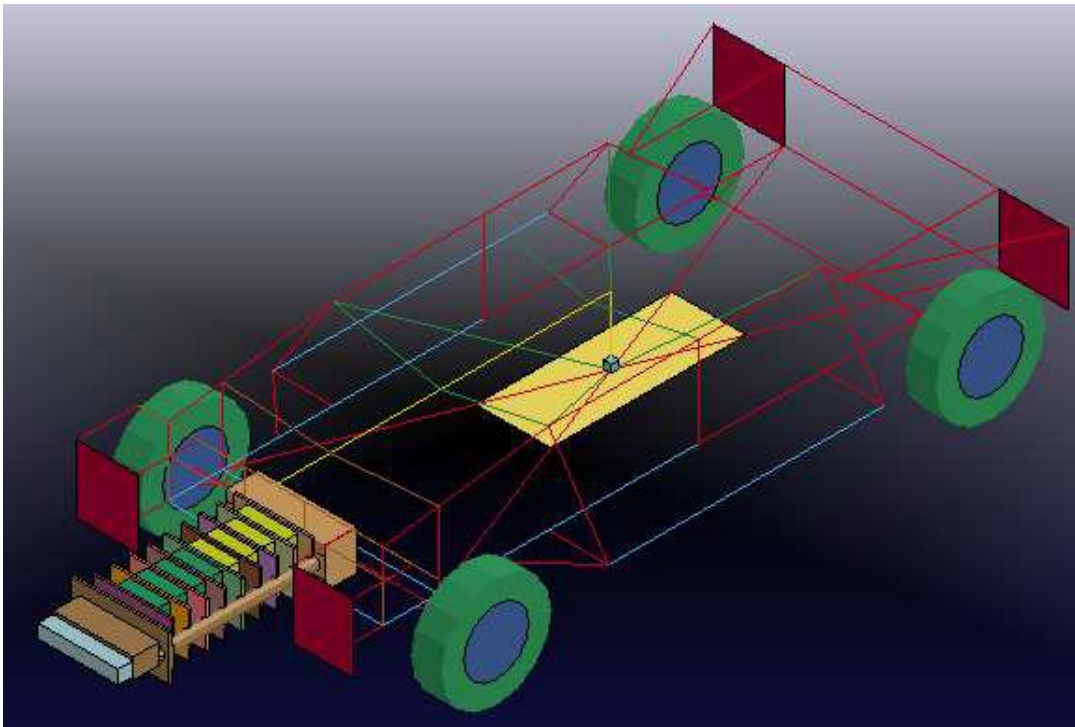


Figura 7. 1 Bogie original.

Para que la simulación cumpla la normativa vigente sobre las pruebas de impacto lateral, ha sido necesario escalar el frontal impactador del bogie, para ello se ha borrado la pieza original del modelo descargado y se han creado otras 2 nuevas haciendo uso de la opción BOX SOLID dentro de MESH. El nuevo impactador creado tiene una medida de 1500 mm. de anchura y una altura de 500 mm.

Todas las demás dimensiones características del bogie (ancho de vías, distancia entre ejes o batalla, distancia del impactador al centro de gravedad...) no han sido necesarias su modificación ya que cumplen la normativa vigente.

A continuación, a cada una de las partes se le asignó un material y una sección. Para la parte que impacta sobre el coche se le ha asignado un material HONEYCOMB, ya que según el manual del LS-Dyna es el indicado para materiales compuestos o espumas. Para la parte que une las guías deslizantes del bogie y el panel que impacta sobre el coche se le ha asignado un material RIGID. A las dos partes se les asigno una sección SOLID ya que así se les define las propiedades de un sólido continuo [24].

En la tabla 7.2 se detalla las propiedades de los materiales anteriormente descritos.

Material Rigid		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
2,36E-09	2,00E+05	0,3
Material Honeycomb		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
1,60E-11	6,90E+04	0,33

Tabla 7. 2 Propiedades del material impactador.

Para la unión entre la parte rígida y las guías, que también son rígidas, ha sido necesaria la realización de un CONSTRAINED_RIGID_BODIES, ya que este comando une estas 2 partes rígidas y provoca que se comporten como si fuera una sola, siendo la parte MASTER las guías y la parte SLAVE la parte rígida de las creadas. En la figura 7.2 se puede ver la unión entre dichas partes [24].

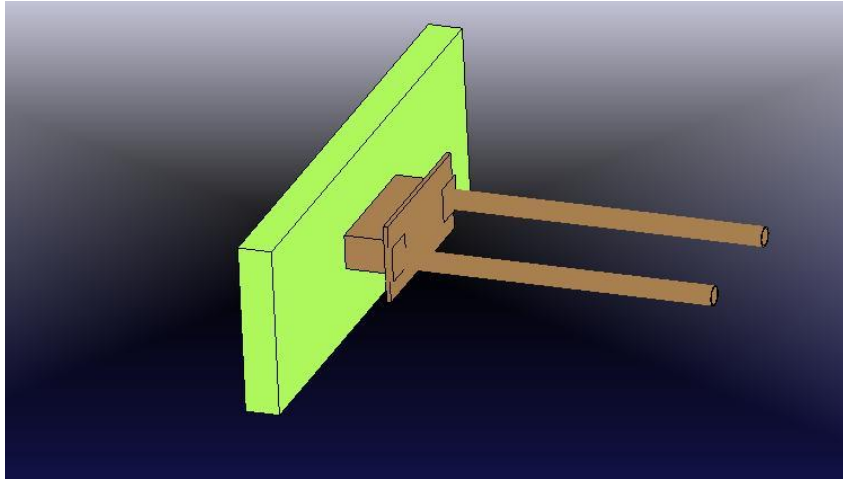


Figura 7. 2 Unión entre la parte rígida y las guías.

Para la unión de la parte HONEYCOMB y la parte RIGID, es necesario crear dos SET PART. El comando SET es una herramienta para definir grupos de nodos, partes, elementos o segmentos de tal forma que luego pueden usarse estos SET para definir contactos, cargas, condiciones de contorno, etc. de una manera mucho más amigable. Cada SET PART corresponde a cada parte creada [24].

Posteriormente se les ha asignado un contacto AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE siendo el HONEYCOMB el SLAVE y el RIGID el MASTER, asignando unos valores de coeficiente estático de 0,8 y un coeficiente dinámico de 0,4. Estos valores se han definido mediante la ecuación 7.1.

$$\mu = \mu_D + (\mu_E - \mu_D)^{-DC \cdot |V_{rel}|} \quad \text{Ecuación 7.1.}$$

Siendo μ el coeficiente de rozamiento total, μ_D el coeficiente de rozamiento dinámico y μ_E el coeficiente de rozamiento estático. El parámetro DC es una constante que es definida por el tipo de contacto y la V_{rel} la velocidad relativa entre las superficies de los elementos.

En la figura 7.3 se observa la unión de estas dos partes creadas.

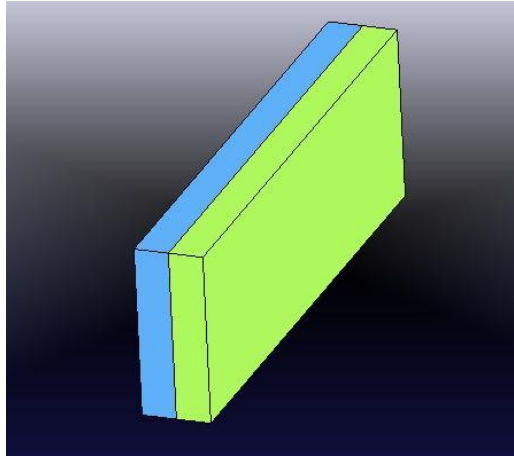


Figura 7. 3 Unión entre la parte rígida y la deformable.

En la figura 7.4 se muestra el bogie con el impactador ya escalado.

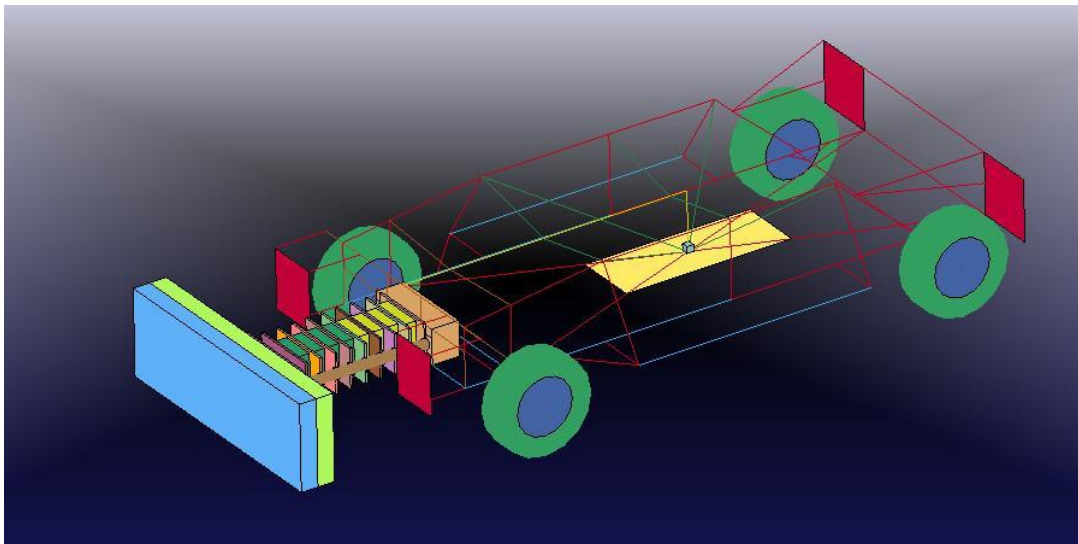


Figura 7. 4 Bogie con impactador escalado.

Terminadas todas estas operaciones sobre el bogie se pueden resumir las características principales del mismo:

- El bogie se compone de 4515 nodos.
- Existen 27 partes, siendo las más representativas las ruedas, guías deslizantes y las placas impactadoras.
- El bogie está compuesto de 2906 elementos, en su mayoría del tipo SOLID (2286), pero también existen tipo SHELL (488), BEAM (130) y SEATBELT ACCELEROMETER (2).
- Los materiales utilizados en el modelo del bogie son ELASTIC (utilizado en la estructura del bogie), RIGID y HONEYCOMB.

- El modelo de simulación tiene en cuenta la aceleración de la gravedad, esta aceleración se ha modelado mediante el comando `LOAD_BODY_Z`, asignándole un valor de 9810 mm/s².
- El bogie posee 2 acelerómetros, uno de ellos situado en el centro de gravedad del bogie y el otro se encuentra situado en una guía deslizante.

7.2. VEHÍCULO

El vehículo descargado de la página web de *National Crash Analysis Center* es el modelo Geo Metro desarrollado en el año 2000, posee 209 partes, la mayoría de ellas del tipo SHELL, existiendo también del tipo SOLID, DISCRETE, MASS y BEAM [3].

Este modelo usa en la mayoría de los elementos que lo componen material tipo `PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`. Este material se caracteriza por tener un comportamiento elasto-plástico, es decir, se comporta inicialmente como un material elástico de manera lineal, hasta alcanzar el límite elástico, entonces su comportamiento deja de ser lineal, empezando a sufrir grandes deformaciones, absorbiendo de esta manera grandes cantidades de energía [27].

En la tabla 7.3 se muestran las características mas representativas de este material.

Material Piecewise_Linear_Plasticity		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
7,890E-9	2,10E+05	0,3

Tabla 7. 3 Valores del material Piecewise_Linear_Plasticity.

En el centro de gravedad del vehículo se encuentra un acelerómetro, la información que recoge se podrá explotar durante el post-procesado.

El vehículo se ve afectado por la aceleración de la gravedad, esta aceleración se ha introducido en el modelo mediante el comando `LOAD_BODY_Z`, siendo el valor asignado de 9810 mm/s².

Conociendo las características iniciales del vehículo, hay que proceder a la modificación del modelo descargado ya que la curva de caracterización de los cristales venía mal definida, provocando que fuese imposible de simular el choque al producirse un error durante la simulación en el LS-Dyna.

Posterior a esta modificación, se importaron los asientos de otro modelo de automóvil (Ford Taurus) ya que el vehículo utilizado para la simulación carecía de ellos. Para ello fue necesario borrar todos los elementos, nodos, partes, contactos y todas las relaciones referentes a ellos del modelo Taurus, a excepción de los asientos.

En la figura 7.5 se muestran los asientos procedentes del modelo Ford Taurus.

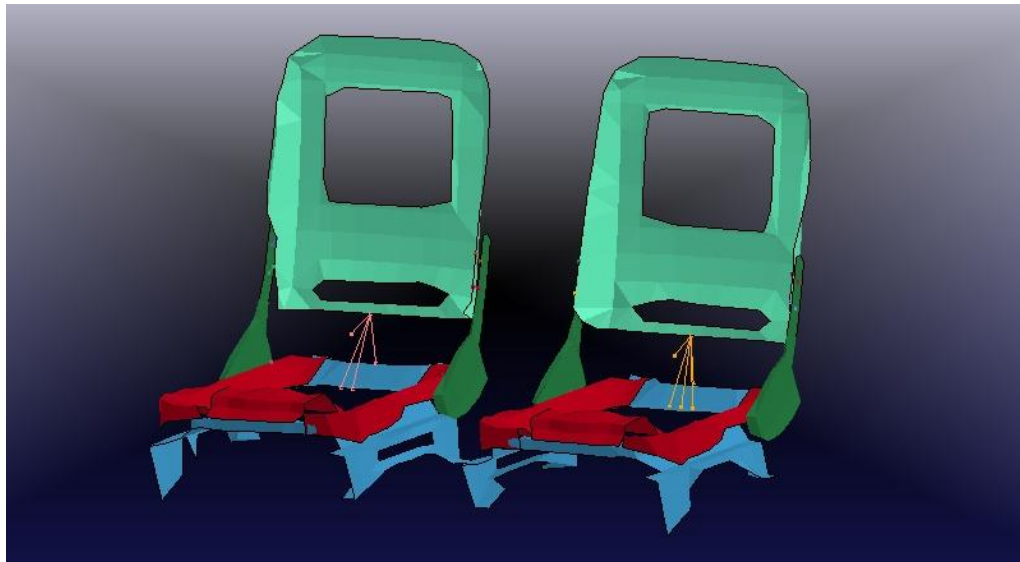


Figura 7. 5 Asientos del modelo Ford Taurus.

Una vez importados los asientos, lo siguiente es posicionarlos en el interior del coche con un TRANSLATE, este comando permite mover o trasladar entidades dentro del modelo de simulación. Seguidamente hay que unir los asientos al coche. Para realizar esto se ha usado un total de ocho CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY (CNRB), por lo que se ha simulado la unión de cada asiento mediante 4 tornillos al suelo del vehículo.

En la tabla 7.4 se muestran las características del material utilizado en los asientos.

Material Rigid		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
7,850E-9	2,00E+05	0,3

Tabla 7. 4 Propiedades del material de los asientos.

El último paso a realizar para terminar de configurar los asientos es incluirlos en el SET_PART número 5 del coche. Este SET_PART, que incluye todas las partes del coche para definirlos en un mismo conjunto, es utilizado por el programa para definir el contacto mediante el comando CONTACT entre las distintas partes del coche. Incluyendo los asientos en este SET_PART, el contacto ya los tiene en cuenta en la simulación.

El contacto que se utiliza en este SET_PART es del tipo AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, este contacto no tiene una superficie maestra definida ya que siempre tiene en cuenta el espesor de los materiales tipo SHELL, además para evitar una penetración inicial y asegurar así el correcto funcionamiento, en el proceso de modelado se han diseñado los elementos con una pequeña separación entre ellos.

A continuación se observa la figura 7.6 en la que se muestra el modelo del coche con los asientos ya importados.

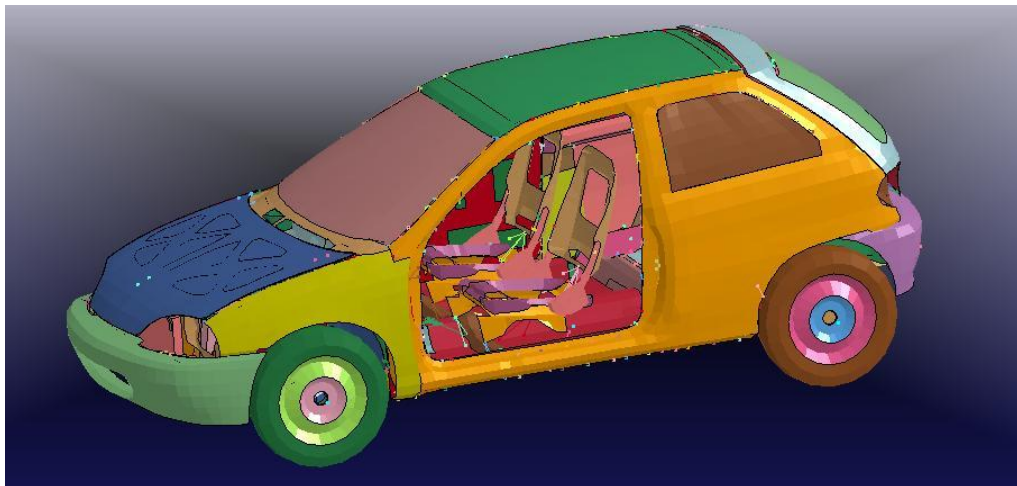


Figura 7. 6 Modelo de Coche y asientos.

Posteriormente se importa el bogie o carro impactador. La figura 7.7 muestra el resultado.

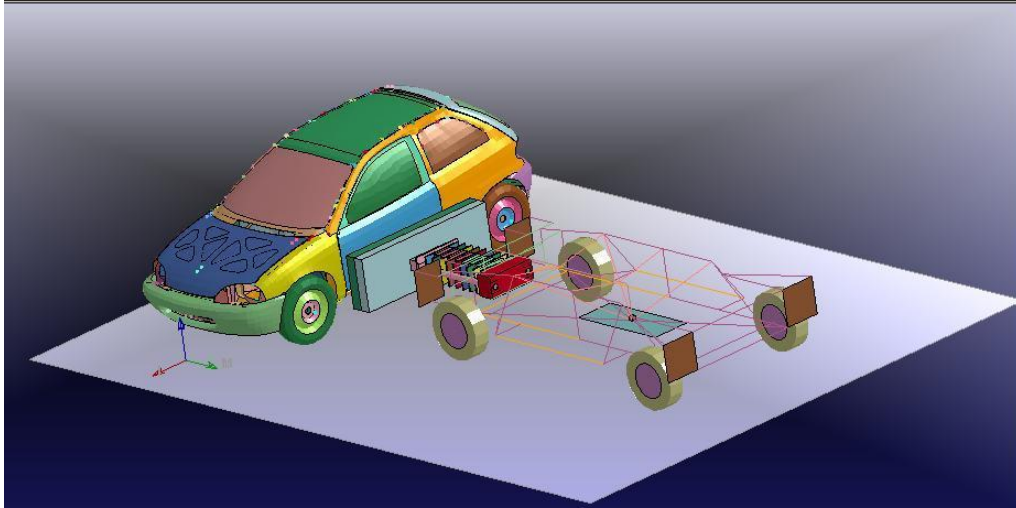


Figura 7. 7 Modelo de Coche y bogie.

Una vez el carro impactador se ha importado es necesario definir el suelo. Para ello se ha utilizado el comando RIGIDWALL_PLANAR Z (la normal del suelo tiene dirección Z), esta opción es una sencilla manera para procesar el contacto entre una superficie rígida y puntos de un cuerpo deformable.

El suelo definido inicialmente ha tenido que modificarse variando la altura del suelo respecto el centro de coordenadas del sistema para evitar que existiera penetración de alguna de las ruedas. Por último, es necesario definir un coeficiente de rozamiento para el suelo, el valor asignado a sido 0.8, que es el correspondiente a un asfalto normal seco con neumáticos nuevos [30].

A continuación se definen los contactos entre todas las entidades pertenecientes al modelo. El contacto entre el bogie y el suelo, así como el contacto entre coche y el suelo, se realizan de manera simultánea y automática al definir el suelo ya que anteriormente se ha definido el coeficiente de fricción.

El contacto entre bogie y coche se ha definido mediante un AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, este tipo de contacto está recomendado para simulaciones de análisis de choque, debido a que la orientación de las partes implicadas no puede ser anticipada siempre. Los coeficientes de rozamiento son 0,8 para el estático y 0,4 el dinámico, y han sido determinados gracias a la ecuación 7.1 [31].

Por último se le asigna la velocidad de impacto al bogie, esta operación se realiza mediante el comando INITIAL_VELOCITY_GENERATION. Existen diferentes comandos para introducir la velocidad

de impacto al bogie, pero la elegida está recomendada para definir la velocidad inicial para cuerpos rotacionales y traslacionales.

La velocidad asignada es de 13888 mm/s que corresponde a una velocidad de 50 km/h tal y como estipula la legislación vigente para este tipo de ensayos de choque. Para ello se debe crear un SET PART incluyendo todo el bogie, y seleccionar este SET PART en el comando INITIAL_VELOCITY_GENERATION asignándole la velocidad anteriormente descrita.

La asignación de la velocidad al bogie no se debe realizar antes de importar el bogie o carro impactador ya que no se conoce de antemano si los ejes de referencia son los mismos en los archivos del bogie y el coche.

7.3. DUMMY

Como ya se realizó con los asientos y el bogie, hay que importar el *dummy*. El *dummy* empleado es el modelo USSID versión 4.2 desarrollado por la empresa *Livermore Software Technology Corporation*. Este *dummy* está compuesto de 43871 nodos, y esta especialmente desarrollado para la simulación de choques laterales.

El *dummy* se compone de 70 partes, siendo en su mayoría del tipo SHELL Y SOLID, existiendo también BEAM y DISCRETE. El contacto entre estas partes vienen definidas mediante un CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, además existe un contacto para la parte izquierda del tórax del *dummy* (donde va a sufrir el impacto), definido mediante un CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL para simplificar el proceso de cálculo.

Existen 4 tipos de material que definen el *dummy*, según el tipo de elemento que se quiere modelar. Estos 4 materiales son el FU_CHANG FOAM (para los materiales más blandos), el MOONEY_RIVLIN_RUBBER (para simular el comportamiento del caucho), el ELASTIC y el RIGID.

En la tabla 7.5 se muestran las características de estos 4 materiales usados en el *dummy*.

Material Fu_Chang_Foam		
Densidad Máxima (t/mm ³)	Densidad Mínima (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)
4,41E-11	1,23E-10	20
Material Mooney_Rivlin_Rubber		
Densidad (t/mm ³)	Coeficiente de Poisson	
1,06E-9	0,495	
Material Elastic		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson
1E-9 a 7,79E-9	3,87 a 2.073E+5	0,3 a 0,45
Material Rigid		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson
1E-11 a 1,015E-8	5 a 2,073E+5	0,28 a 0,45

Tabla 7. 5 Materiales dummy

El *dummy* posee 5 acelerómetros, tres de ellos situados en el tórax, otro en la pelvis y el último de ellos en la zona abdominal.

Como ocurre en el bogie y el vehículo, la aceleración de la gravedad se ha implantado mediante el comando LOAD_BODY_Z con un valor de 9810 mm/s².

Importado el *dummy*, es necesario ubicar el *mismo* en el interior del vehículo en la posición del conductor mediante los comandos TRANSLATE y ROTATE (comandos explicados anteriormente en el punto 7.2), también es necesario el uso del comando DUMMY POSITION, ya que así permite el ajuste de las diferentes partes del *dummy*.

Una vez en el interior del vehículo es necesario definir un nuevo SET PART incluyendo todos los elementos y nodos del *dummy*, para así poder definir un contacto entre el *dummy* y el vehículo (definido por el SET PART 5), este contacto es del tipo AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE.

Además fue necesario definir un nuevo contacto tipo RIGID_BODY_ONE_WAY_TO_RIGID_BODY entre asiento y el *dummy*. Los contactos tipo ONE WAY permite que se transfieran fuerzas de compresión y fuerzas tangenciales entre los nodos esclavos y los segmentos maestros. En este caso, el *dummy* es el elemento MASTER y los asientos el elemento SLAVE. Para caracterizar dicho contacto es necesaria una curva que defina la relación de adherencia/penetración que va a tener el contacto del *dummy* sobre el asiento.

A continuación se muestra la figura 7.8 que define la relación adherencia/penetración de dicho contacto.

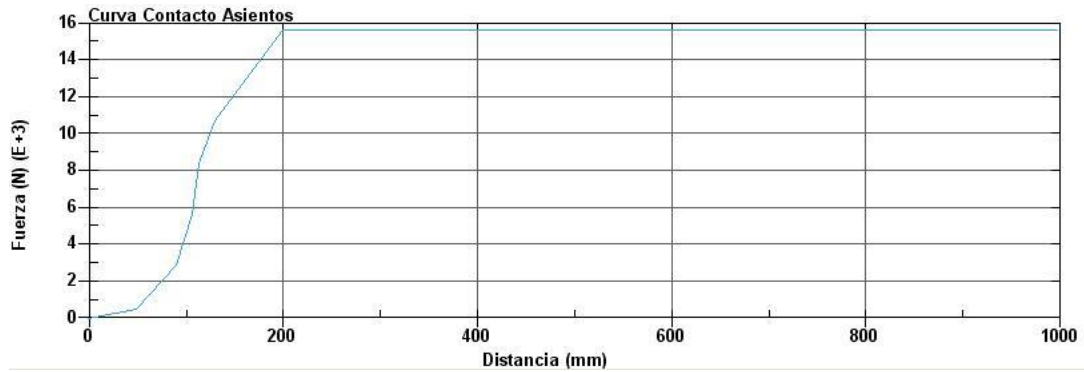


Figura 7. 8 Relación adherencia/penetración de los asientos.

Debido a que el modelo importado carece de un acelerómetro en la cabeza, se hace inevitable la creación de uno y posicionarlo en la cabeza, tal como indica la normativa, ya que es necesario para el análisis de los daños sufridos cuando existe impacto entre la cabeza y cualquier parte del coche.

Para ello se crean 3 nodos, cada uno de ellos pertenece a uno de los ejes de referencia local, seguidamente se hace el acelerómetro mediante el comando SEATBELT_ACCELEROMETER dentro de la pestaña ELEMENT, donde se seleccionan los 3 nodos creados para definir los ejes locales del acelerómetro debiendo hacerles coincidir con los ejes de referencia global. Por último, se realiza un SET NODE de los tres nodos creados para poder hacer un CONSTRAINED con la cabeza. Como ya se comentó anteriormente el comando SET permite la creación de diferentes conjuntos (nodos, elementos, segmentos, partes) para hacer más amigable la programación del modelo a simular.

En la figura 7.9 se puede observar el acelerómetro creado junto con los que vienen inicialmente en el modelo descargado.

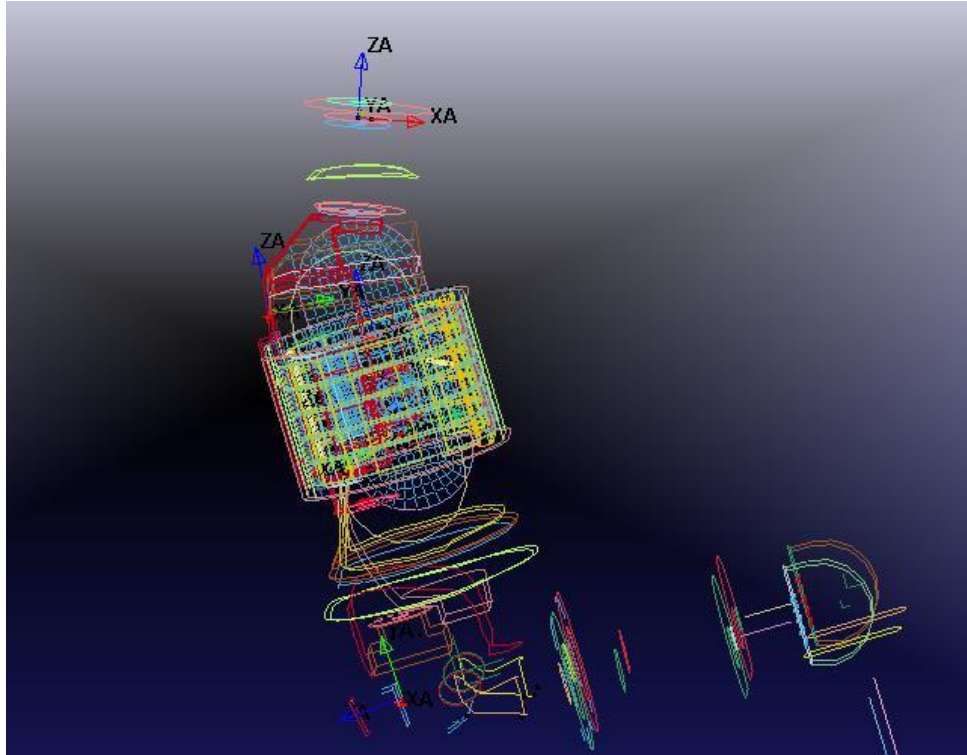


Figura 7. 9 Acelerómetros pertenecientes al dummy.

7.4. CINTURÓN

Para realizar el cinturón, ha sido necesaria la creación de los 4 discos, que simulan los puntos de anclaje y deslizamiento del cinturón de 3 puntos habitualmente utilizado casi en la totalidad de vehículos comercializados.

Estos discos han sido creados a partir de la opción MESH, se les ha asignado un material rígido y una sección SHELL.

La unión de los discos al coche se ha realizado mediante un `CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE`, por lo que se han realizado 4 `CONSTRAINED`. Este tipo de unión permite definir nodos extra a un cuerpo rígido, de tal manera que se limita los grados de libertad de esos nodos. Cada `CONSTRAINED` de cada disco se ha referenciado a distintas partes del coche, ya que están en diferentes lugares, por lo que el desplazamiento de cada disco es independiente del resto de los discos y solo depende del desplazamiento de la pieza a la que esta referenciada.

También se deben añadir los discos en el `SET_PART 5`. De esta forma son incluidos en el contacto existente entre las distintas partes del coche.

En la figura 7.10 se observa la disposición geométrica de estos discos creados.

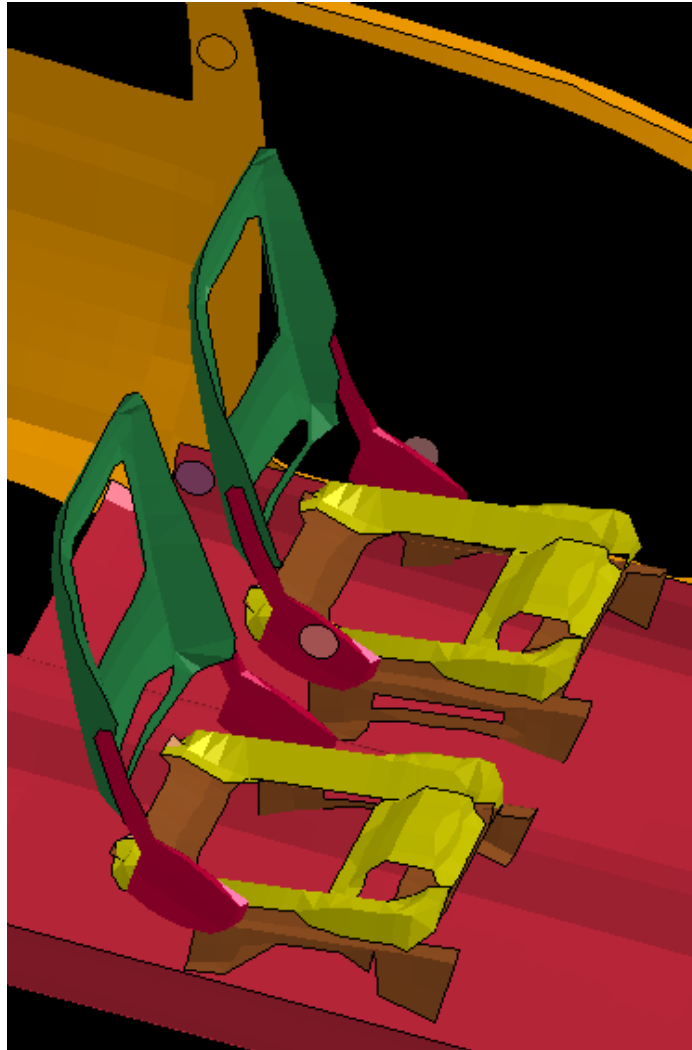


Figura 7. 10 Disposición geométrica de los discos del cinturón.

Se debe crear un SET_SEGMENT del torso y otro de la pelvis, esto es necesario hacerlo para que el cinturón se adapte y tome la forma de estas partes del *dummy*.

Realizado esto, se procede a crear el cinturón en 3 tramos. El primero desde la parte baja del pilar B hasta la parte alta del mismo pilar, el segundo tramo desde este punto hasta la derecha de la pelvis (tramo que se adapta al torso), y el tercer tramo va desde la derecha de la pelvis a la izquierda de la pelvis (tramo que se adapta a la pelvis).

El cinturón se modela con la opción MIXED activada. Esta opción crea dos partes distintas para cada tramo de cinturón. Una primera SIMPLE, que no tiene anchura y otra que si la tiene y que se adapta a la

geometría del *dummy*. Es necesario dotar a cada una de estas partes de una sección y de un material.

A las partes estrechas (SIMPLE) se les asignará una sección del tipo SEATBELT y un material del tipo SEATBELT, con una densidad lineal de 5.97×10^{-7} t/mm y una longitud mínima de cada elemento de 2 mm. También es necesario definir las curvas de carga y descarga del cinturón ya que también van a definir el material.

Del mismo modo, las partes con anchura (MIXED) tienen asignados una sección SHELL, y un material PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, ya que este material es adecuado para simular materiales plásticos con formas superficiales delgadas.

En la tabla 7.6 se muestran las características de los materiales del cinturón.

Material Seatbelt		
Densidad lineal (t/mm)		
5.97 E-07		
Material Piecewise_Linear_Plasticity		
Densidad (t/mm ³)	Módulo Elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
7.890 E-09	2.10 E+05	0.3

Tabla 7. 6 Propiedades del material del cinturón.

Las curvas que definen el comportamiento del cinturón en las situaciones de carga y descarga se muestran en las figuras 7.11 y 7.12 respectivamente.

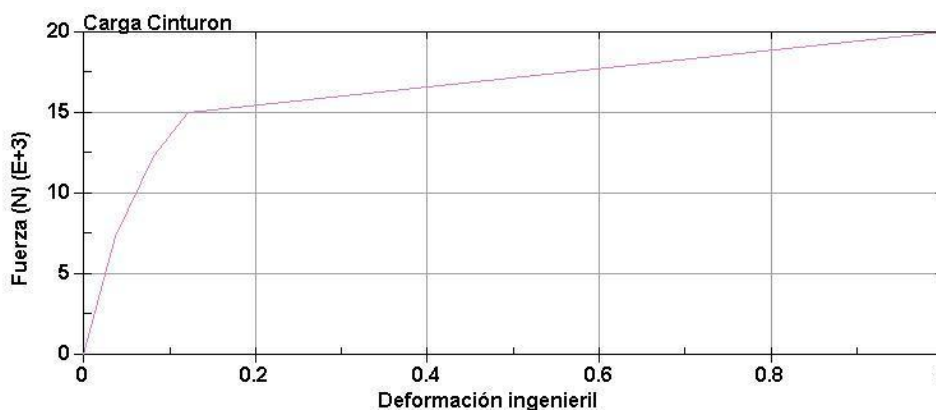


Figura 7. 11 Relación carga cinturón/deformación ingenieril del cinturón.

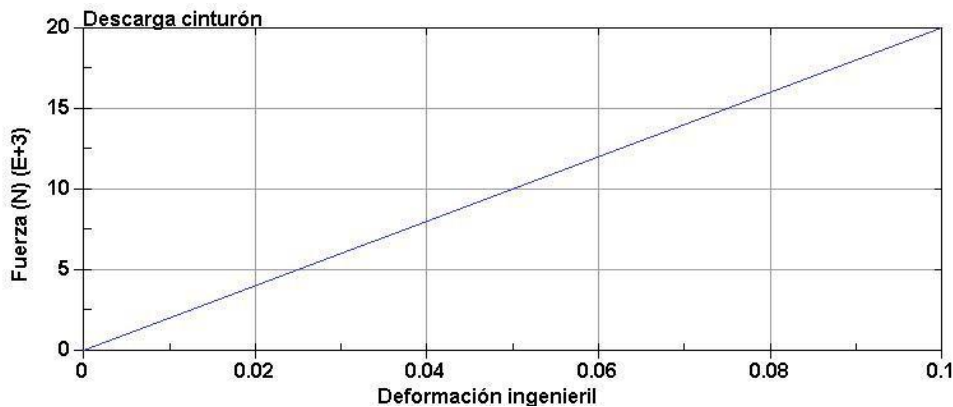


Figura 7. 12 Relación descarga cinturón/deformación ingenieril del cinturón.

El contacto entre el cinturón y el *dummy* se define como un `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`. Por otro lado, es necesario incluir todos los tramos del cinturón en el `SET_PART 5`, como se explicó anteriormente en el apartado 7.2.

Se debe añadir un `RETRACTOR` en un extremo del cinturón, para realizarlo, se debe utilizar el comando `ELEMENT_SEATBELT_RETRACTOR`, siendo necesario definir las curvas de carga y descarga del `RETRACTOR`.

La función del `RETRACTOR` es bloquear el cinturón cuando sufre una aceleración determinada. Para situar el `RETRACTOR` es necesario crear previamente un nodo en el punto en el que empieza el cinturón, sobre el cual se define el `RETRACTOR`. Dicho nodo se une al disco correspondiente mediante el comando `CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE`.

También es necesario crear un sensor o acelerómetro, el cual es el encargado en medir la aceleración que necesita el `RETRACTOR` para saber cuándo debe activarse y bloquear así la extensión del cinturón. El acelerómetro se crea mediante el comando `ELEMENT_SEATBELT_SENSOR`.

Por último, se definen dos `SLIPRING` para simular el deslizamiento que el cinturón sufre en las uniones con cambio de dirección, es decir, en el anclaje de la derecha de la pelvis del *dummy* y en el anclaje superior del pilar B del coche. Como sucedía con el `RETRACTOR`, también es necesario crear previamente un nodo en cada punto en el que se vaya a situar un `SLIPRING`. Dichos nodos se unen a sus respectivos discos mediante el comando `CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE`. La creación del `SLIPRING` se crea mediante el comando `ELEMENT_SEATBELT_SLIPRING`.

En la figura 7.13 se muestra el conjunto del cinturón creado.

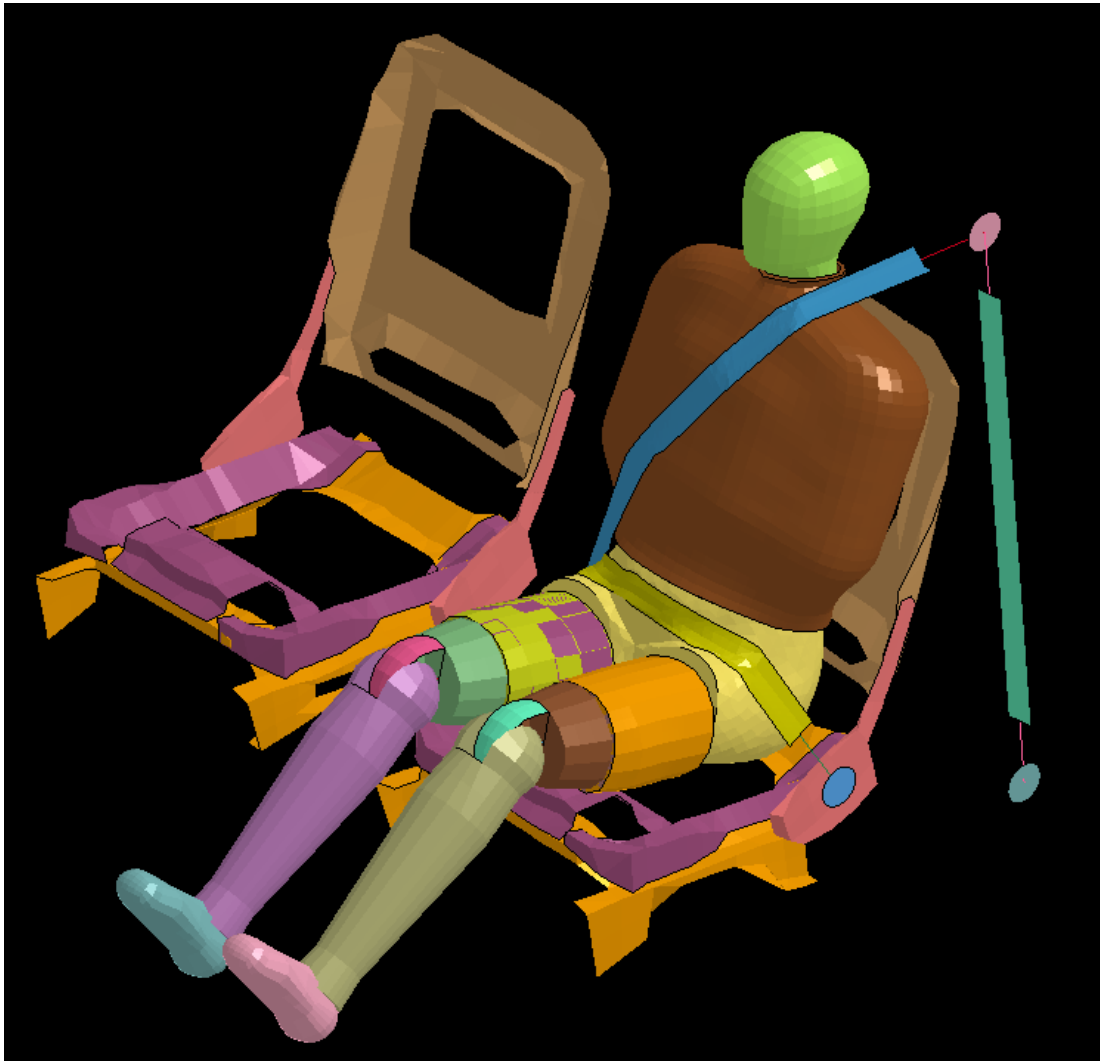


Figura 7. 13 Cinturón creado para la simulación.

8 RESULTADOS

En el ensayo realizado de simulación de un choque lateral con *dummy* con cinturón, se obtienen multitud de datos que nos ayudan a predecir el comportamiento real de todos los elementos involucrados en el choque lateral.

El programa LS-Dyna recoge los datos que el usuario le indique registrar, tales como la velocidad, las fuerzas, las aceleraciones, las deformaciones, etc. Estos datos se recogen según las condiciones que marque el usuario a través del LS-PrePost en su fase de preprocesado. Todos estos datos registrados por el LS-Dyna podrán ser visualizados y tratados posteriormente con el programa LS-PrePost operando como postprocesador.

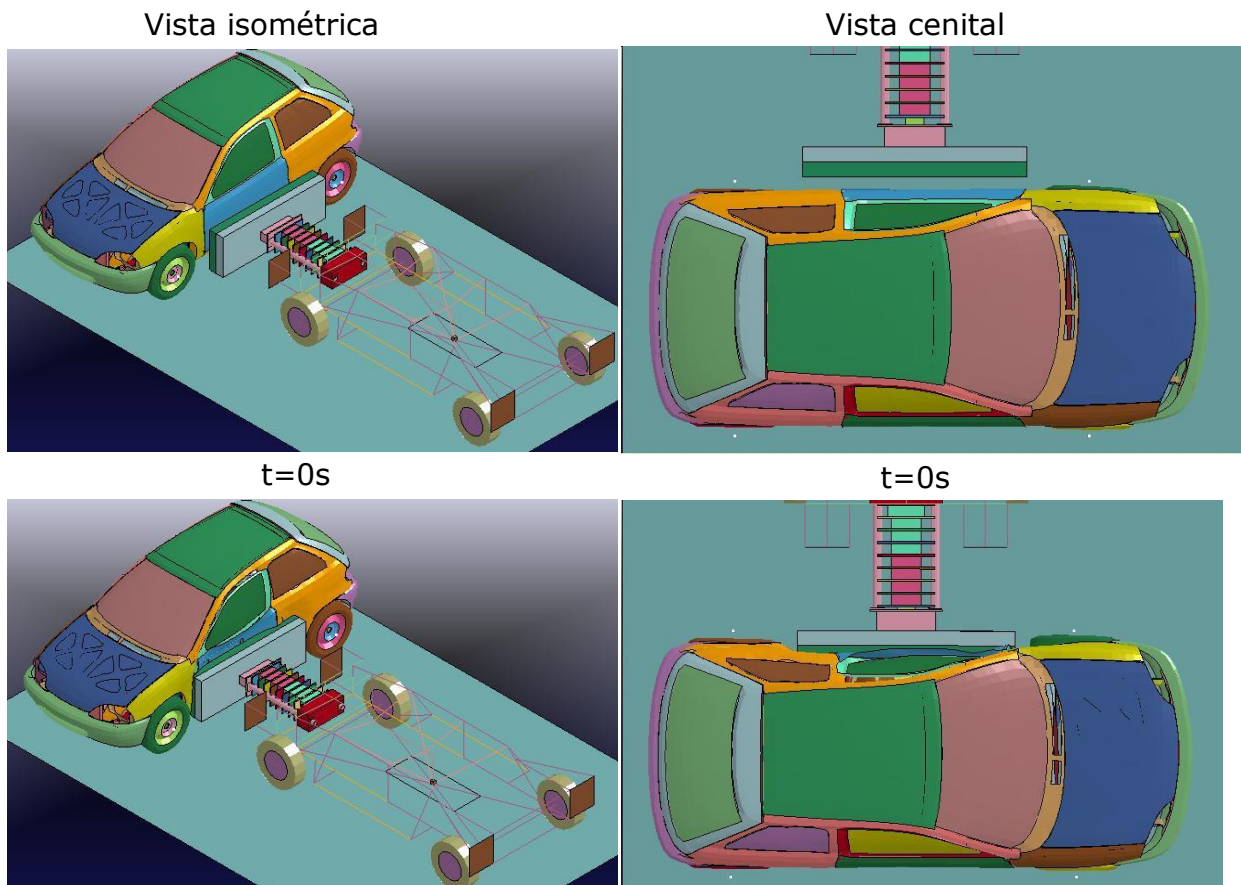
Los datos que se han recogido mediante el programa LS-Dyna son los señalados en el Reglamento 95. Estos datos son los valores de la aceleración resultante en el centro de gravedad de la cabeza del sujeto de la prueba de choque. La aceleración ha sido posible registrarla mediante el acelerómetro creado en ese punto (proceso explicado en el apartado 7.3). Este valor de aceleración ha sido registrado, ya que es necesario para el cálculo del valor *HIC* (*Head Injury Criteria*). Este valor *HIC* ya fue explicado anteriormente en el capítulo 6.2.

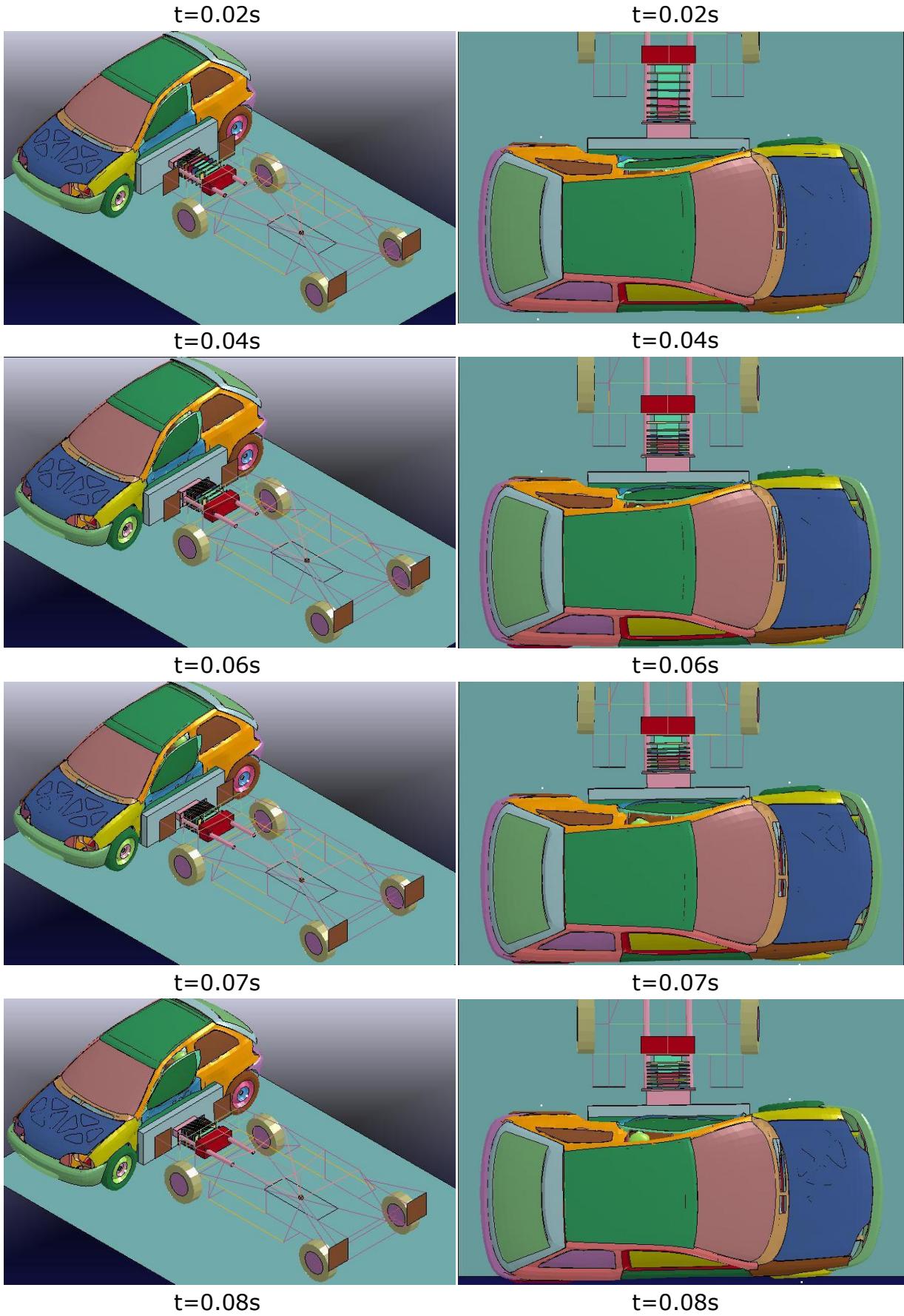
8.1. ENSAYO DE CHOQUE LATERAL CON UN *DUMMY* CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS

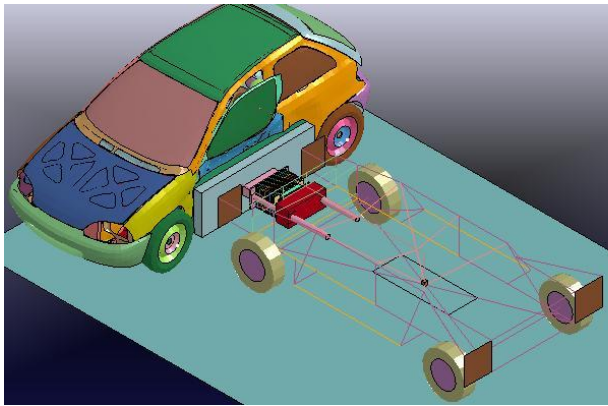
Este caso lleva a cabo la investigación del choque lateral, donde se incluye en el estudio de la colisión la consecuencia y eficacia del uso del cinturón de seguridad. El intervalo de tiempo que realiza la simulación es de 120 ms, registrándose los resultados cada 5 ms. Los cálculos de simulación han sido realizados mediante un ordenador con procesador Intel Core 2 Duo a 2,13 GHz y memoria RAM de 3 GB, por lo que el tiempo de simulación bajo LS-Dyna V970 ha sido aproximadamente 4,5 horas.

En la tabla 8.1 se muestra la secuencia de choque desde el exterior con vista isométrica y cenital. En la tabla 8.2 se muestra la secuencia desde el interior con vista frontal y cenital.

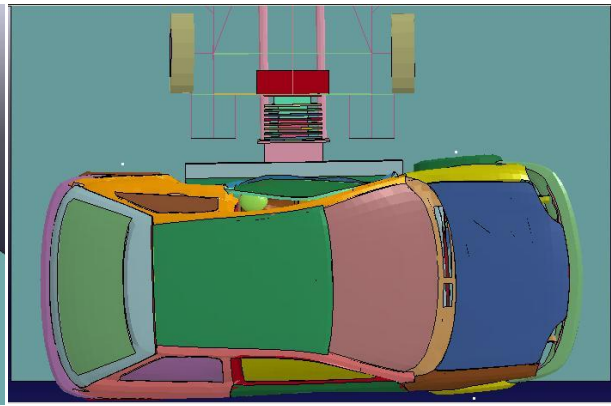
Tabla 8. 1 Vistas exteriores isométrica y cenital.



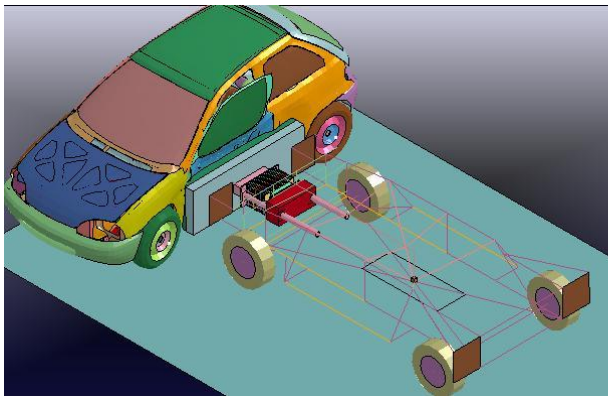




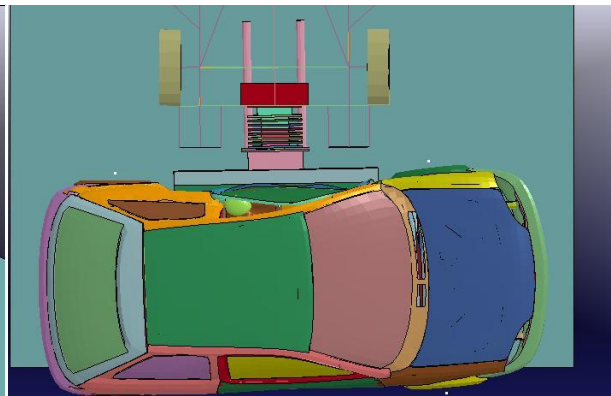
t=0.09s



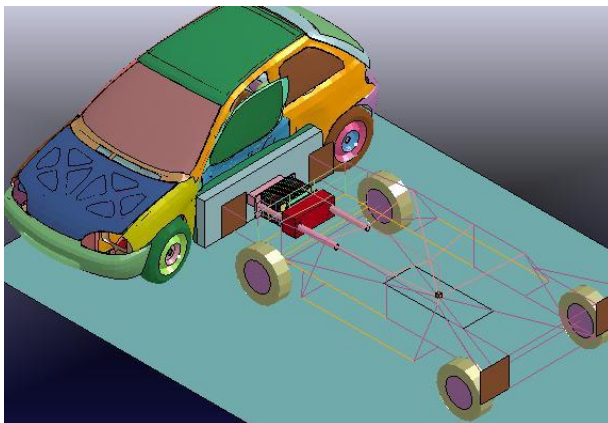
t=0.09s



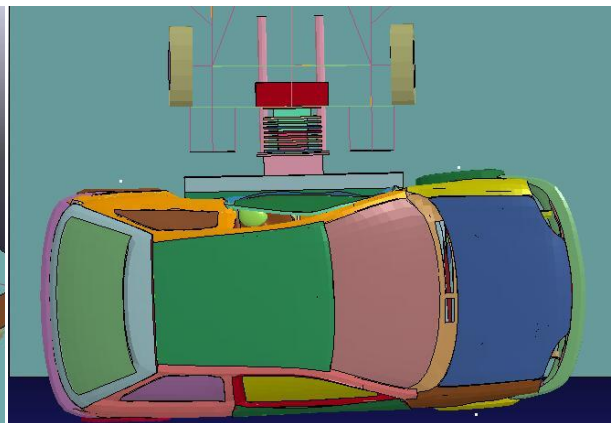
t=0.10s



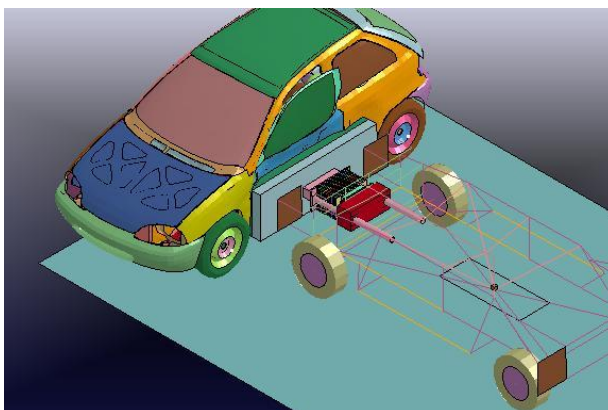
t=0.10s



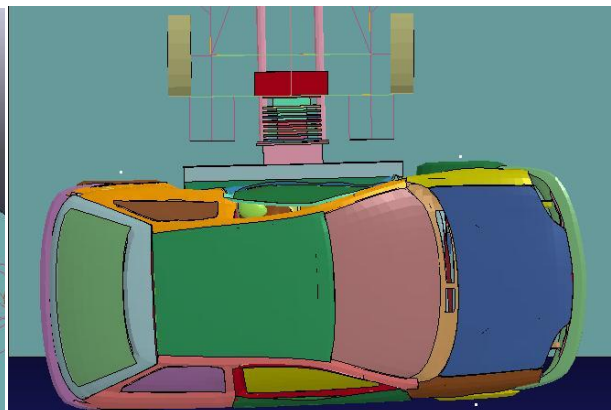
t=0.11s



t=0.11s



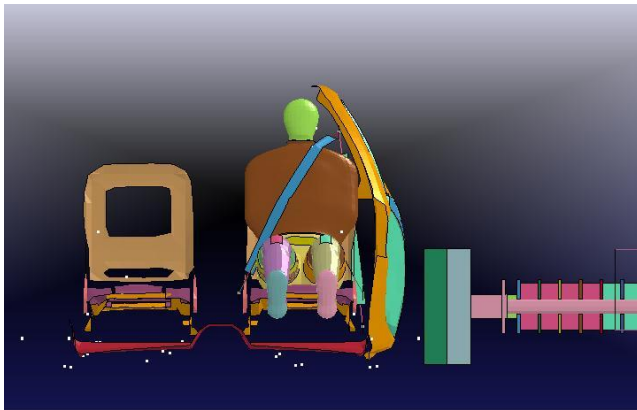
t=0.12s



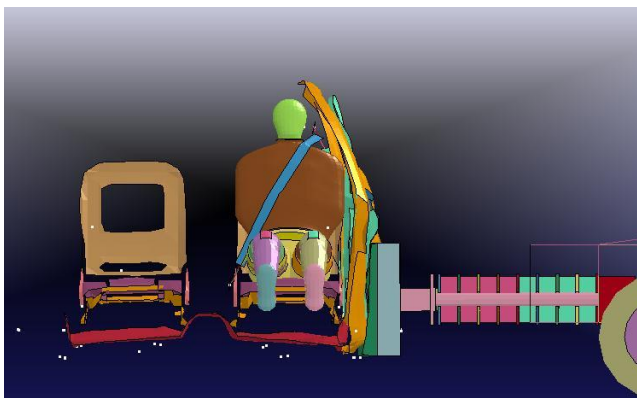
t=0.12s

Tabla 8. 2 Vistas interiores frontal y cenital.

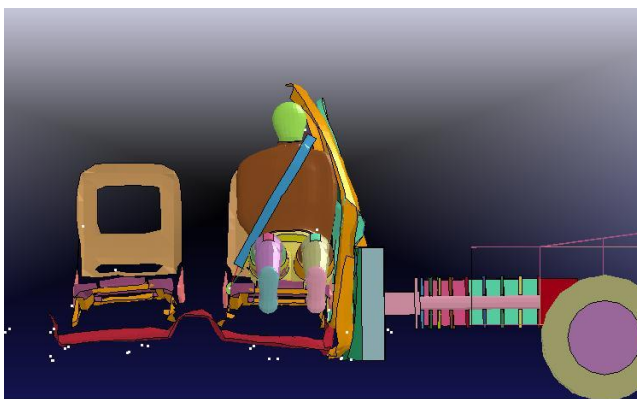
Vista frontal interior



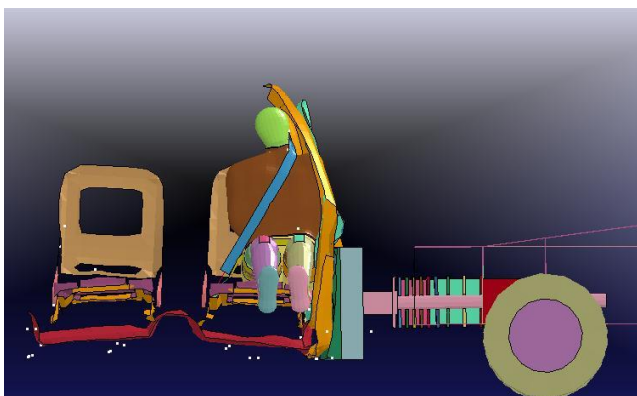
t=0s



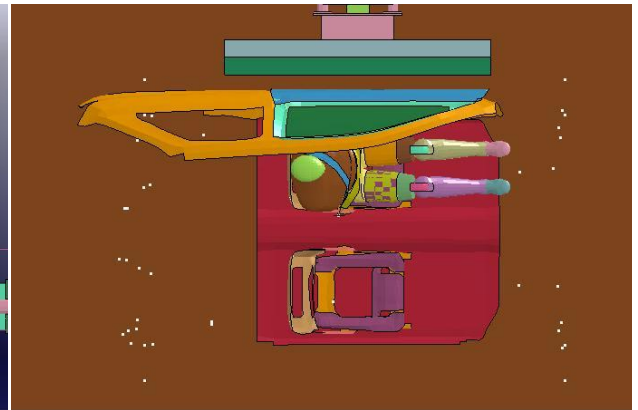
t=0.02s



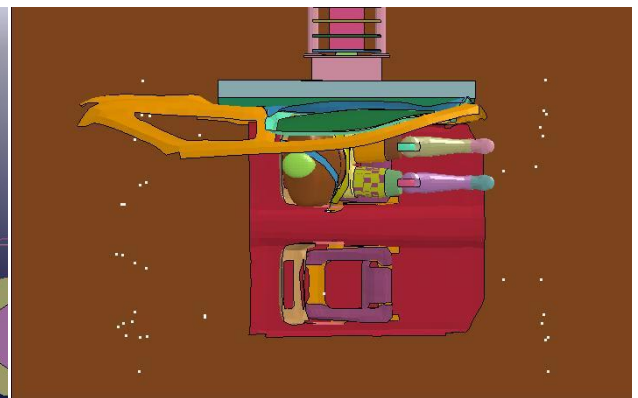
t=0.04s



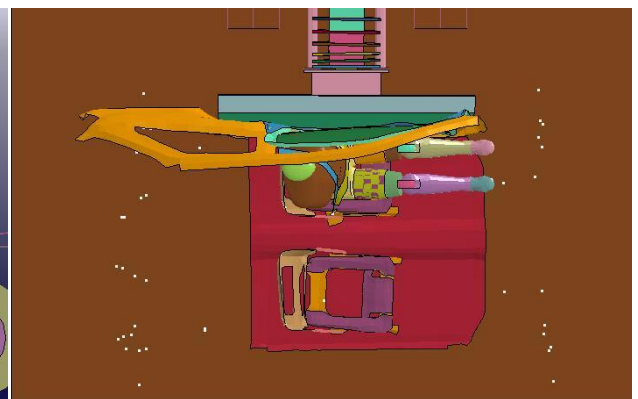
Vista cenital interior



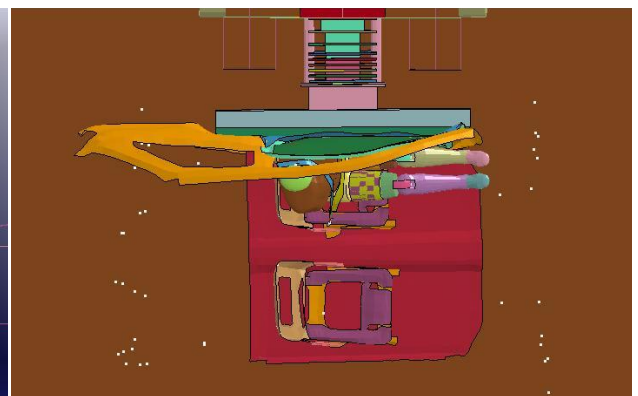
t=0s

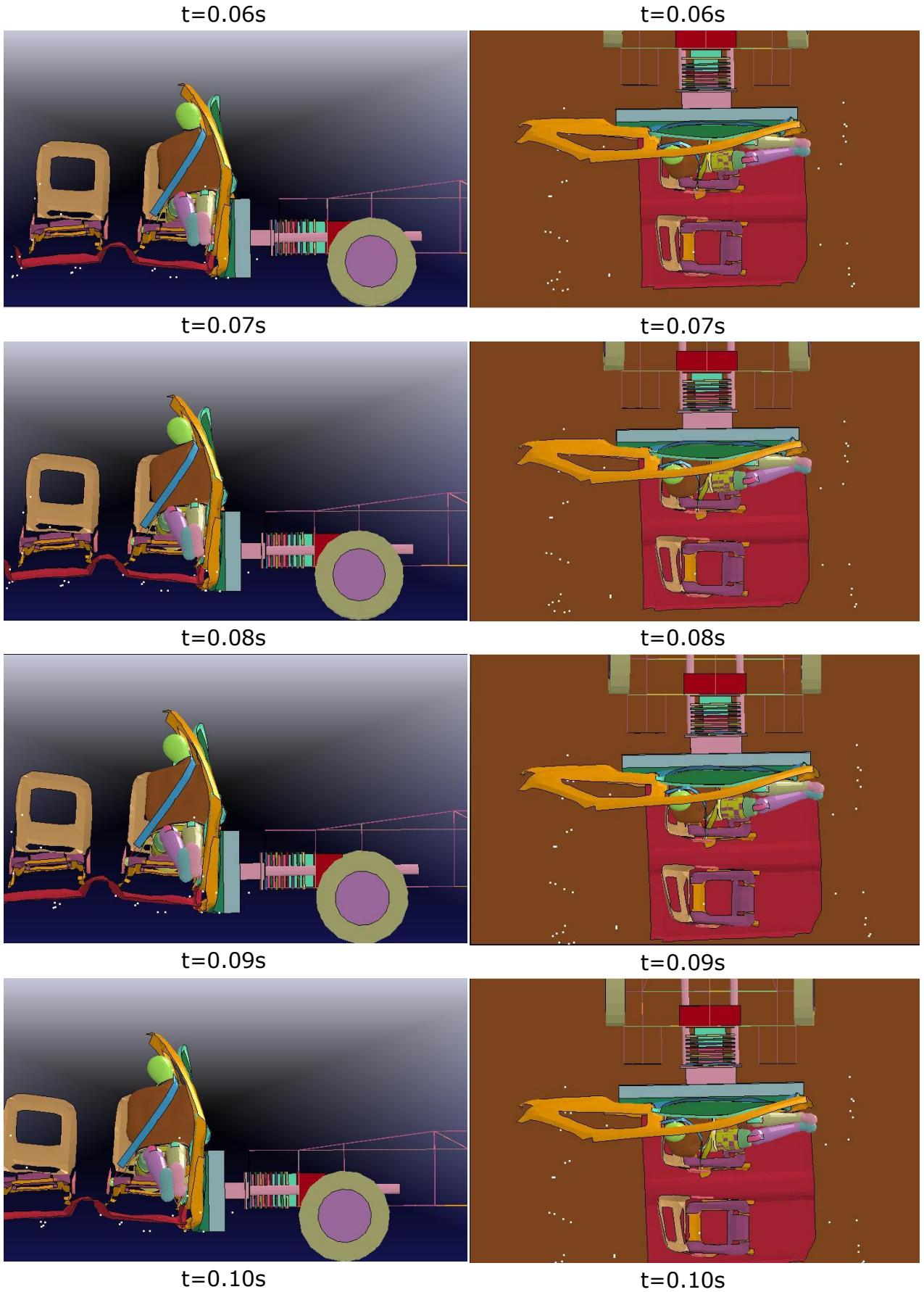


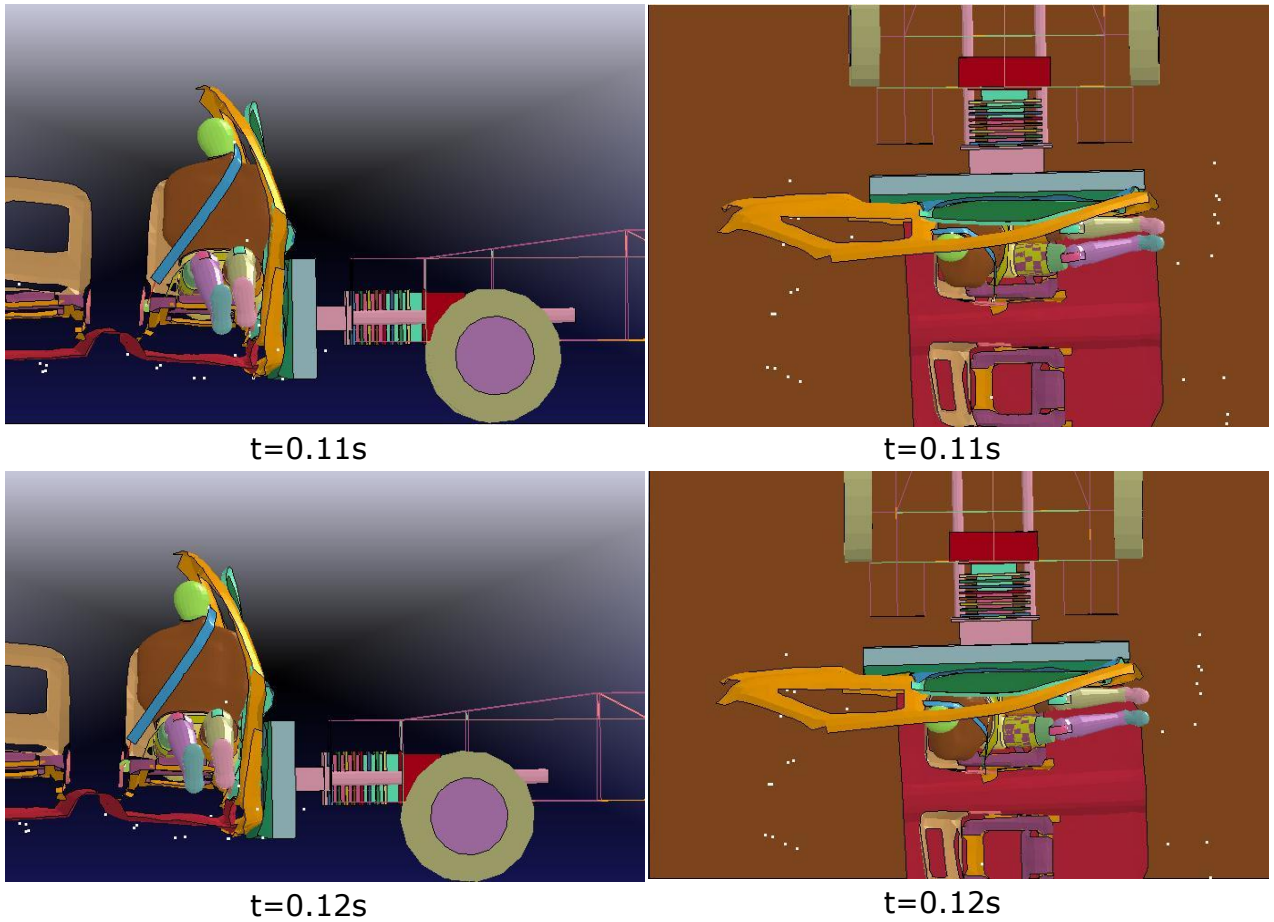
t=0.02s



t=0.04s







Como se observa en la tabla 8.2, el *dummy* sufre diferentes impactos en distintas zonas del cuerpo a pesar de hacer uso del cinturón. El *dummy* sufre impactos en la cabeza, lateral del torso y pierna izquierda, siendo la más grave o severa el producido en la cabeza.

Las figuras 8.1 y 8.2 representan la velocidad y aceleración que sufre la cabeza durante el proceso de simulación.

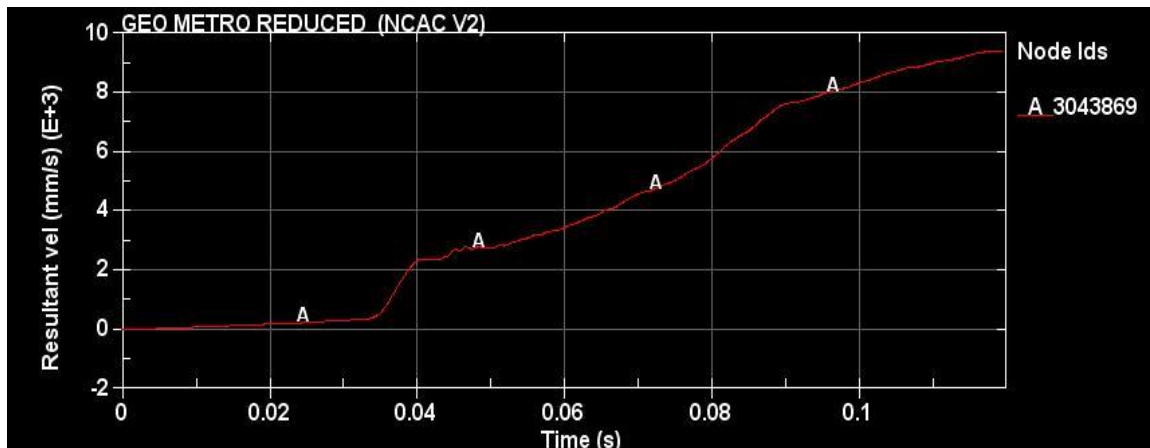


Figura 8. 1 Velocidad de la cabeza del dummy.

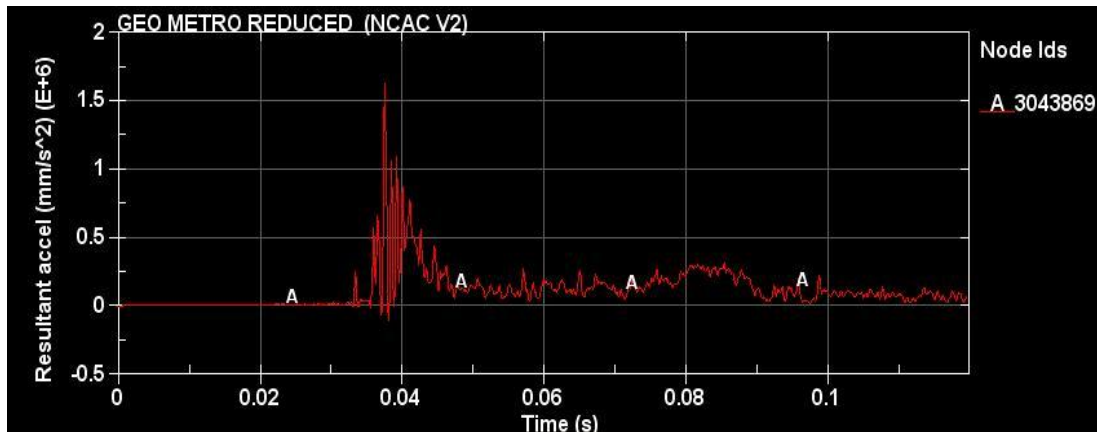


Figura 8. 2 Aceleración de la cabeza del dummy.

En la figura 8.1 se muestra la velocidad del nodo 3043869 que corresponde con el acelerómetro situado en el centro de gravedad de la cabeza. Se observa que la cabeza del *dummy* va ganando velocidad de manera prácticamente lineal a partir del instante 0,04s hasta alcanzar una velocidad final de 34 km/h aproximadamente. El tiempo 0.04 s coincide cuando la puerta del coche empieza a contactar con el *dummy*, detalle que puede observarse en la tabla 8.1.

En la figura 8.2 se observa la aceleración del nodo 3043869. Puede observarse que en el instante 0.038 s se origina una aceleración máxima aproximada de 167g's. Este valor es alto, pero su duración es ínfimamente pequeña.

A continuación se muestra la figura 8.3 donde queda registrado el valor del *HIC*.

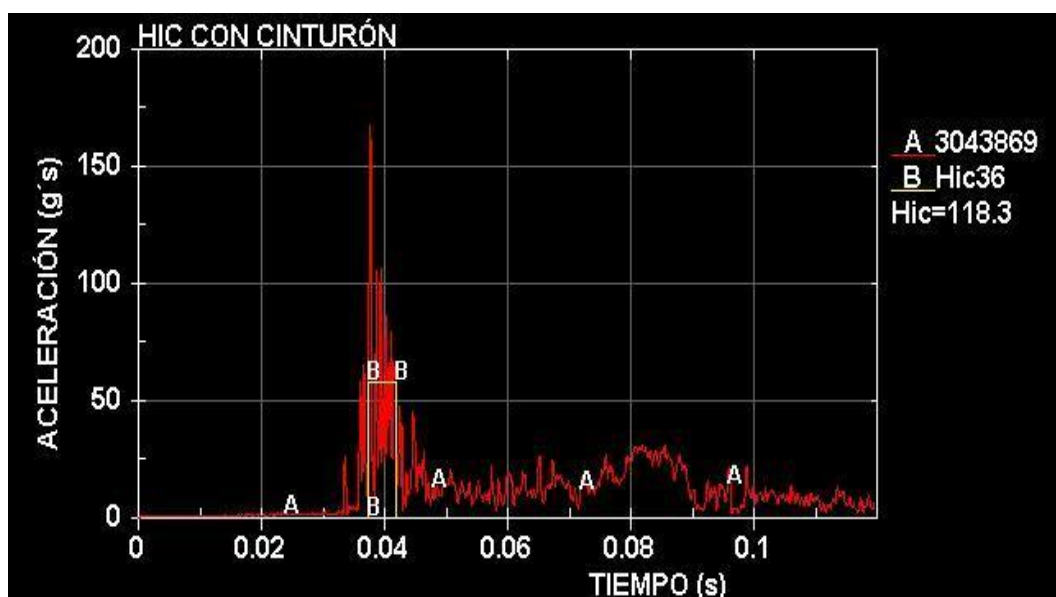


Figura 8. 3 Gráfica del HIC con cinturón.

Para el caso simulado, el valor registrado para el *HIC* es 118,3 por lo que no supera el valor máximo de descrito en el Reglamento 95.

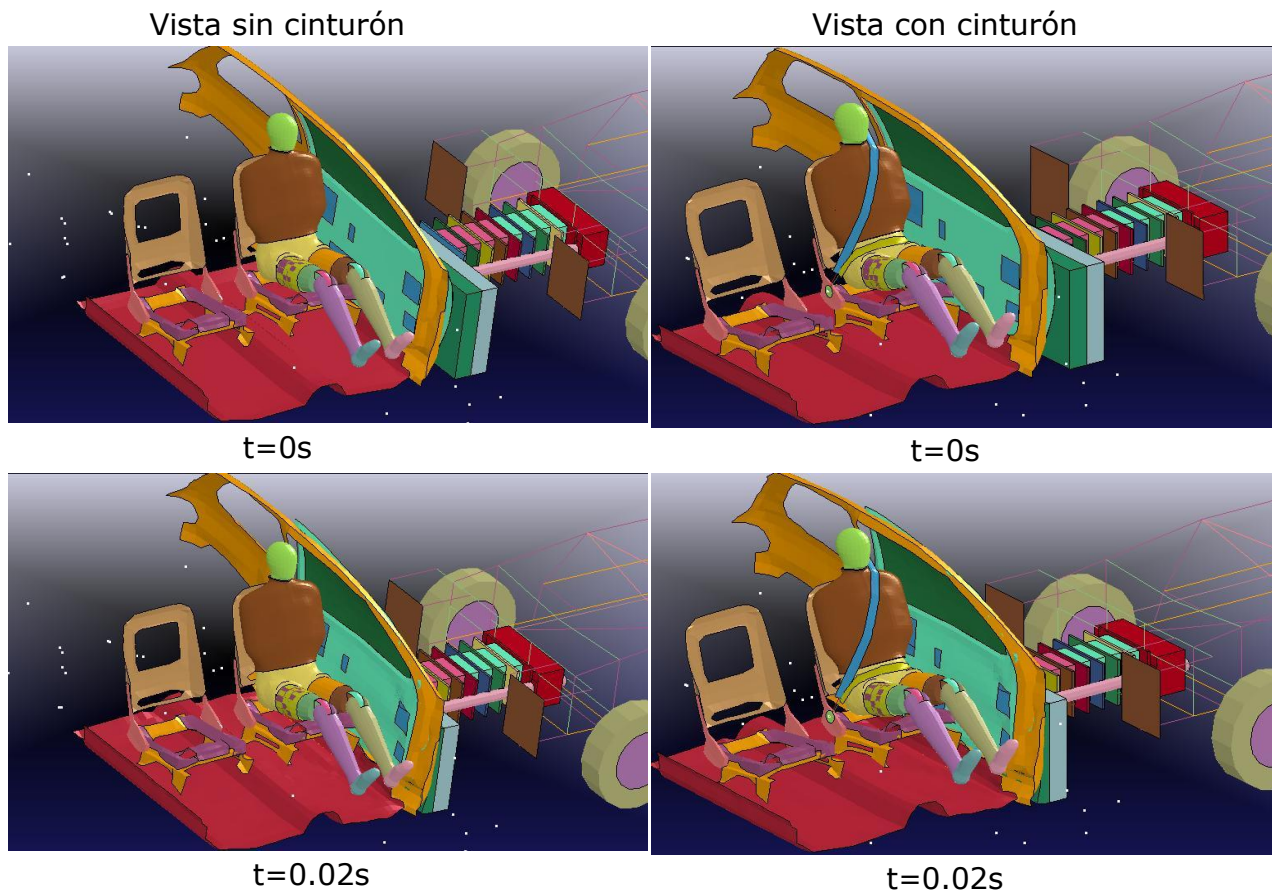
8.2. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

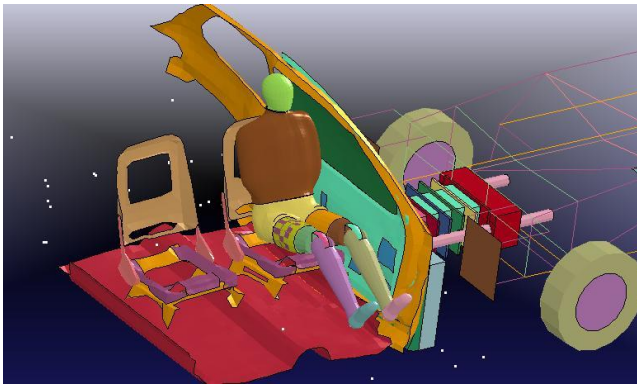
Gracias al proyecto "SIMULACIÓN DE UN CHOQUE LATERAL CON *DUMMY* SIN CINTURÓN MEDIANTE LS-DYNA" se hace una comparación entre los resultados obtenidos en ambos proyectos. De esta forma se determina la efectividad real del cinturón como elemento de seguridad pasiva [32].

Además se hace una evaluación de las lesiones que se producen en los dos casos según el valor *HIC* obtenido en el ensayo de choque.

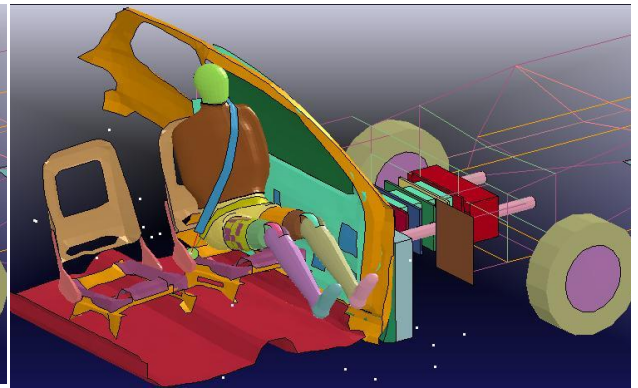
Para un mejor análisis de estas dos pruebas se va a representar la secuencia del choque en la tabla 8.3.

Tabla 8. 3 Vistas isométricas comparando el caso sin cinturón y con cinturón.

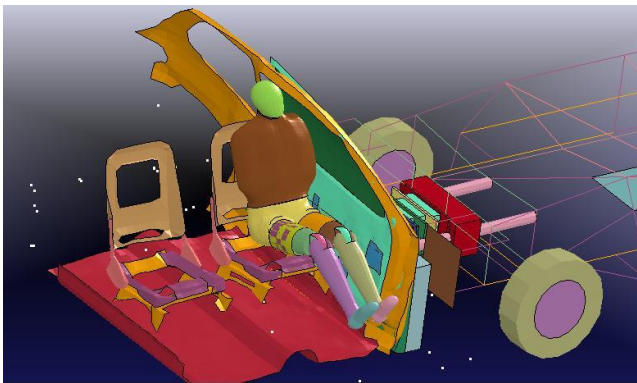




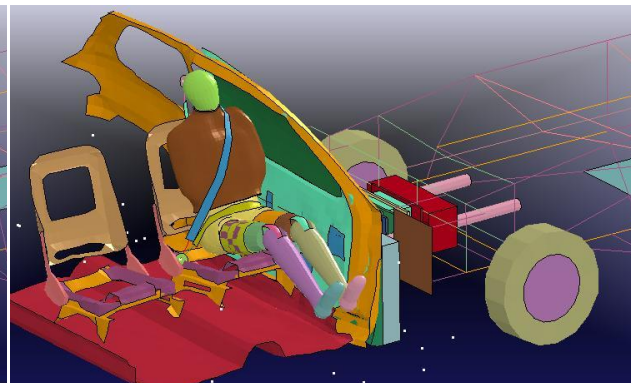
t=0.04s



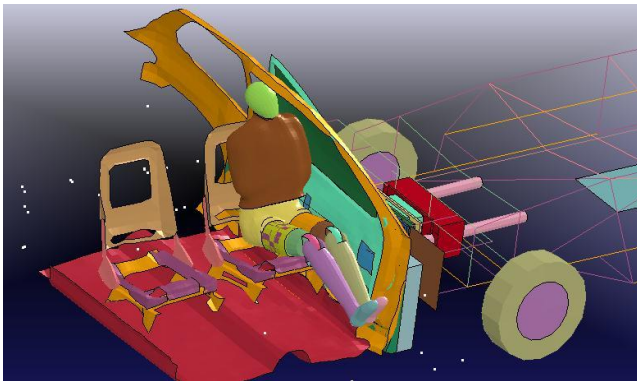
t=0.04s



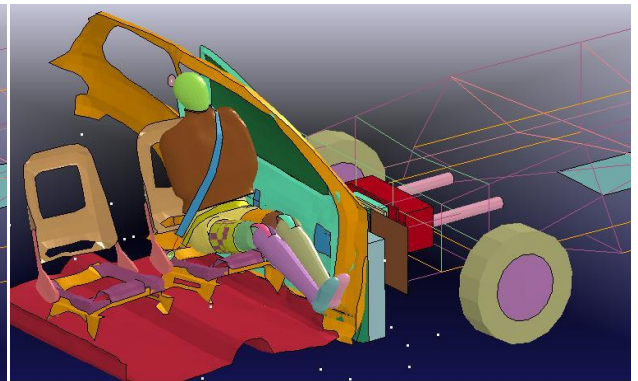
t=0.06s



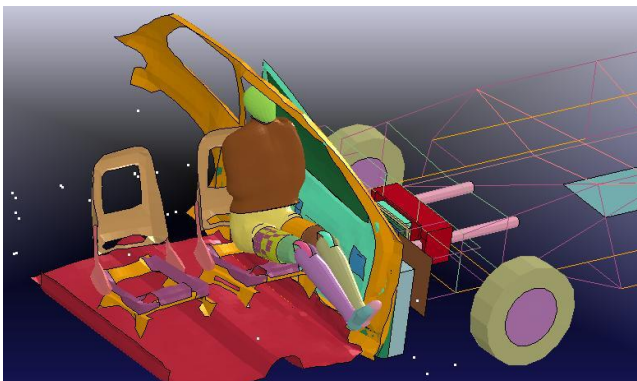
t=0.06s



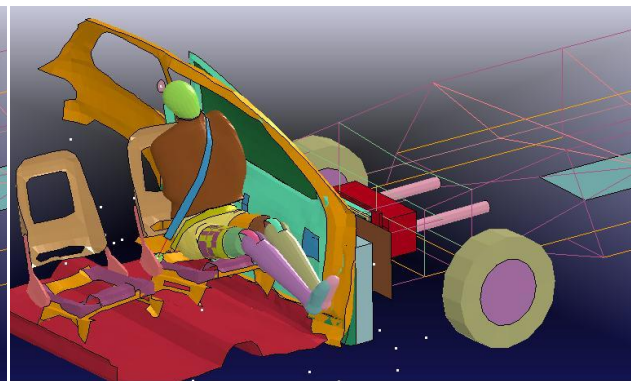
t=0.07s



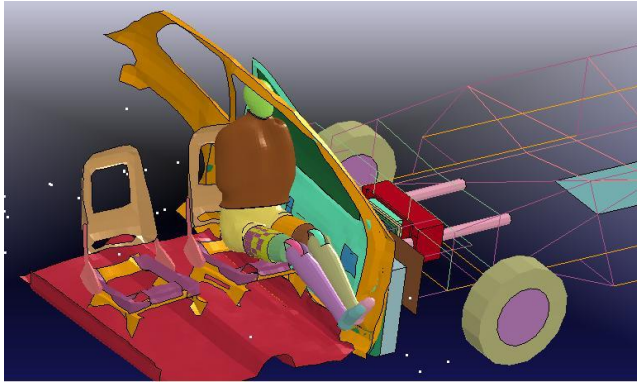
t=0.07s



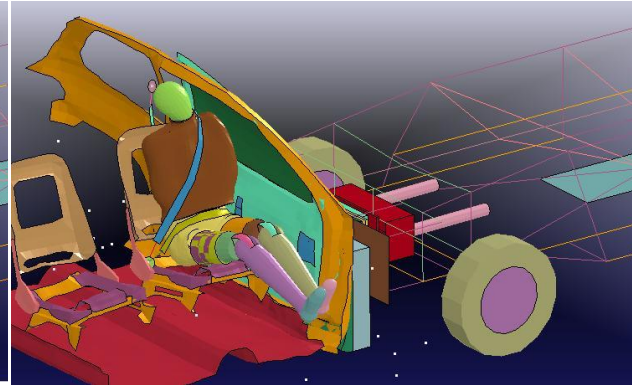
t=0.08s



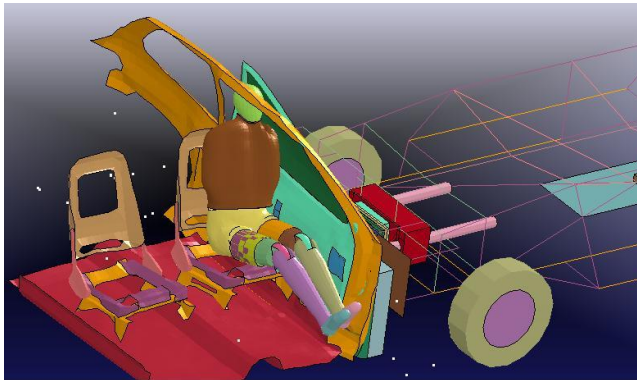
t=0.08s



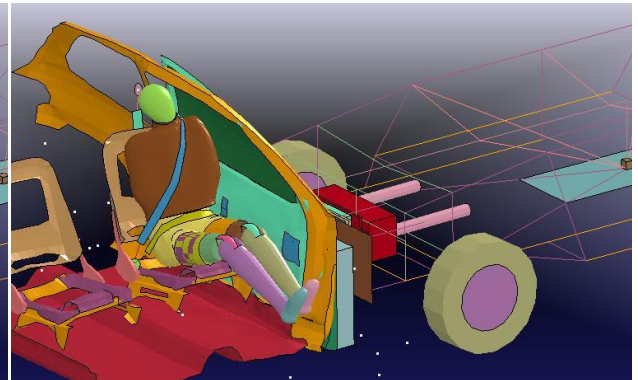
t=0.09s



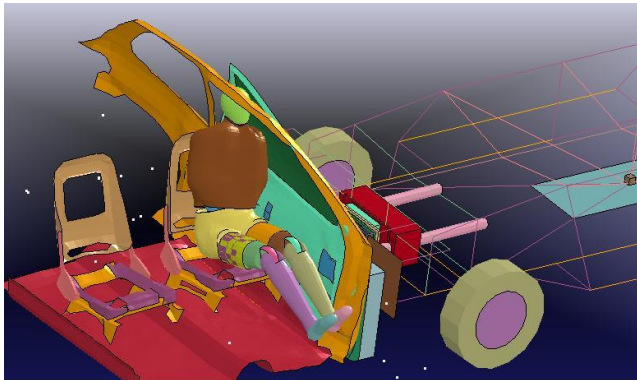
t=0.09s



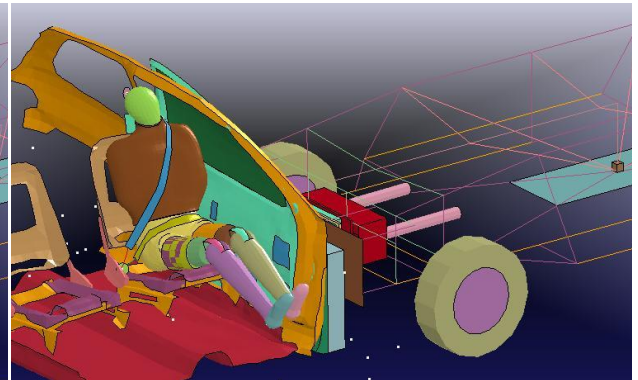
t=0.10s



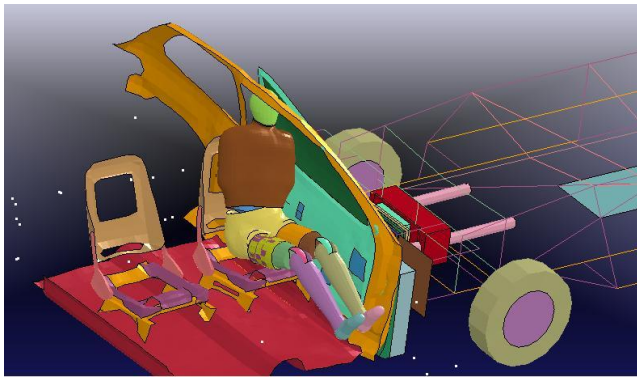
t=0.10s



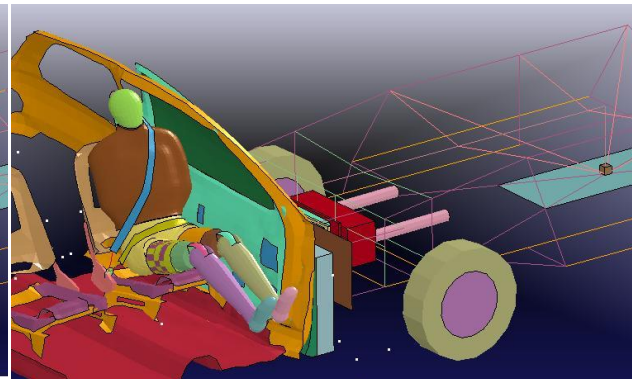
t=0.11s



t=0.11s



t=0.12s



t=0.12s

Como se observa, el desplazamiento del *dummy* está mucho más controlado y limitado en el caso con cinturón que en el caso sin cinturón, lo que provoca una disminución cuantitativa del impacto soportado por el *dummy*.

Como el *dummy* no sufre tanto impacto es de suponer que la aceleración soportada por la cabeza, así como el HIC producido sobre ella serán mucho menores. Estas sospechas se confirman al observar las gráficas de la aceleración (figura 8.4) y el HIC (figura 8.5) del caso simulado sin cinturón.

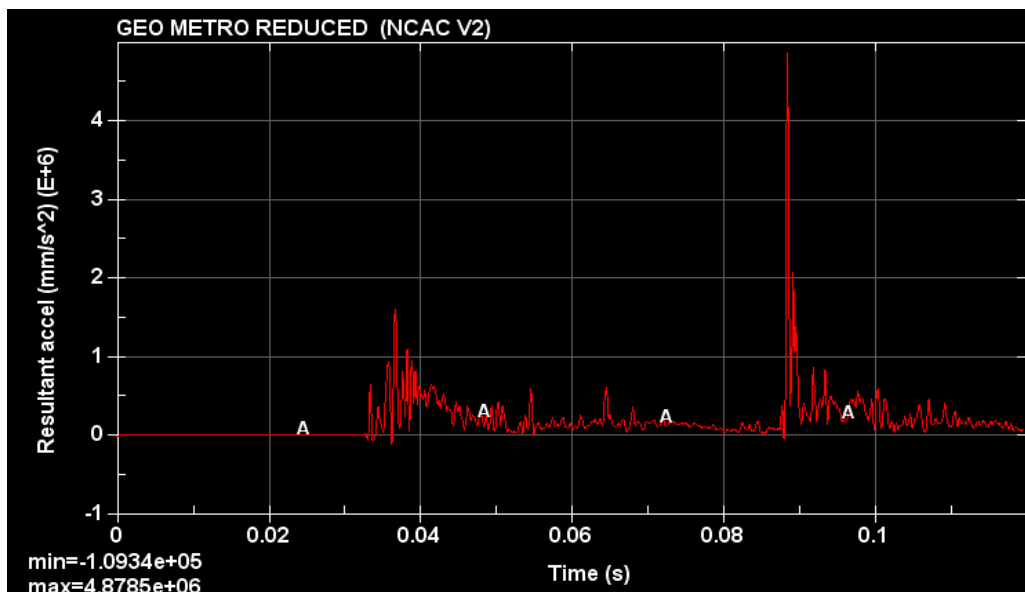


Figura 8. 4 Aceleración de la cabeza del dummy sin cinturón.

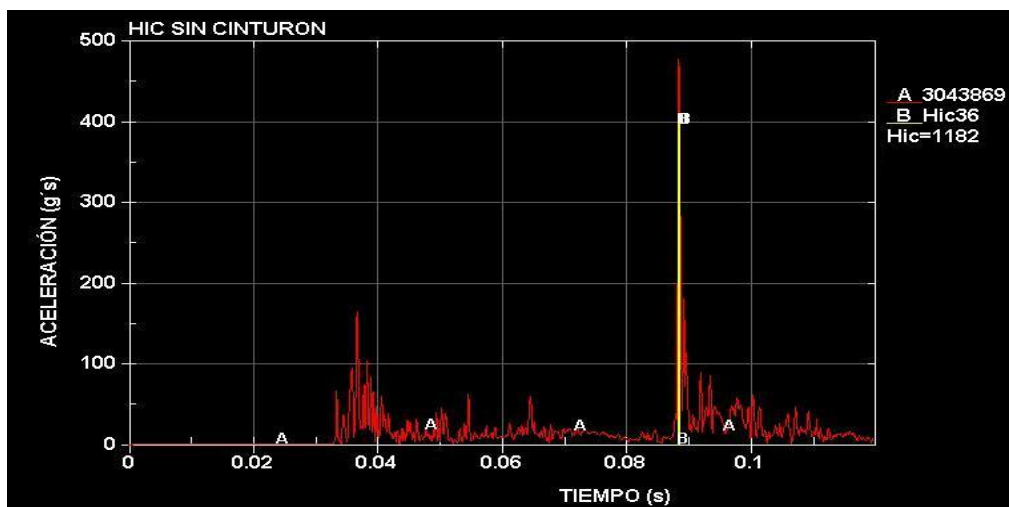


Figura 8. 5 Gráfica del HIC del dummy sin cinturón.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1 CONCLUSIONES

La simulación de este caso de choque lateral realizada mediante los software LS-PrePost y LS-Dyna permite conocer los daños que se producen, y la importancia del uso del cinturón para evitar, en gran medida, estos daños.

Este proyecto representa un aumento en la dificultad del cálculo computacional, debido al gran número de modelos independientes (bogie, vehículo y *dummy*) y la creación del cinturón de seguridad.

Las conclusiones obtenidas a raíz de este proyecto y la comparación con el proyecto "SIMULACIÓN DE UN CHOQUE LATERAL CON *DUMMY* SIN CINTURÓN MEDIANTE LS-DYNA" son muy significativas y resolutivas.

La reducción de la **aceleración** en el centro de gravedad de la cabeza es significativa, esta se ha reducido de 489 g's a 167 g's, es decir, se produce una **reducción del 66%**.

En lo relativo del **HIC**, el valor registrado se reduce drásticamente, siendo el *HIC* sin cinturón de 1182 y el *HIC* con cinturón de 118.3, esto significa que este valor **se reduce un 90%** gracias al uso del cinturón de seguridad.

A continuación, utilizando la tabla 6.1, se compararan los daños producidos en los dos distintos casos según el valor del HIC hallado anteriormente.

Para el impacto sin cinturón, se obtiene un valor del HIC de 1182 por lo que el accidente puede producir sobre el *dummy* un periodo de inconsciencia de una a seis horas, pudiendo producirle al sujeto de prueba un aplastamiento del cráneo. Según la EuroNCAP las lesiones en la cabeza tendrán una valoración roja, es decir, la más negativa posible. En este caso el sujeto tendrá una alta probabilidad de una lesión grave e incluso podría llegar a causarle la muerte.

Para el impacto con cinturón, el valor del *HIC* es de 118.3 por lo que producirá un dolor de cabeza e incluso podrá provocar un pequeño mareo. Los daños sobre la estructura craneal serán inapreciables por lo que la valoración recibida por la EuroNCAP para las lesiones cerebrales y craneales será verde. Este accidente se podrá considerar como un accidente leve.

Por lo tanto, se concluye que el uso del cinturón de tres puntos en un choque lateral reduce drásticamente los daños que se producen en el accidente.

En definitiva, LS-Dyna junto con LS-PrePost constituyen un complejo software capaz de simular con gran precisión impactos en automóviles. No es de extrañar entonces que su uso esté tan extendido entre los fabricantes de automóviles, ya que las simulaciones son altamente realistas y permite obtener resultados sin necesidad de llevar a cabo un *crash test* real, con la reducción del coste económico que ello conlleva.

9.2 TRABAJOS FUTUROS

Gracias a este proyecto se abre una puerta para la realización de trabajos futuros, pudiendo ser mejorado el modelo presentado o desarrollando nuevos modelos a partir del nuestro, algunos ejemplos de trabajos futuros podrían ser:

- Mejora y optimización, entrando con más detalle, de los parámetros introducidos en el modelo de simulación, como puede ser el contacto entre *dummy* y asientos o el grado de exactitud que se desea alcanza en la simulación del modelo.
- Aumentar el número de elementos involucrados en el modelo de simulación, por ejemplo, incluyendo mas *dummies*, incorporando airbag o pretensores de cinturón.

- Modificar la disposición geométrica de los anclajes del cinturón para obtener mejores resultados que podrían ser incluidos en futuros modelos de automóviles.
- Realizar nuevas simulaciones con nuevos materiales de cinturón que mejoren la retención o disminuyan la presión sobre el torso o pelvis.
- Modificación de la velocidad de impacto del bogie o la disposición geométrica del mismo.
- Simulación del choque lateral con distintos modelos de vehículo de diferentes épocas para hacer una comparativa de la evolución de la seguridad pasiva.

10 REFERENCIAS

- [1] "Anuario estadístico de la DGT ". Disponible en www.dgt.es. (Septiembre de 2011).
- [2] "Livermore Software Technology Corporation". www.lstc.com. (Septiembre de 2011).
- [3] "National Crash Analysis Center". www.ncac.gwu.edu. (Septiembre de 2011).
- [4] "Técnicas del automóvil. CHASIS". José Manuel Alonso Pérez. Editorial Thomson-Paraninfo.2008.
- [5] "Sistemas de seguridad activa: Sistemas de freno ABS". <http://www.etp.uda.cl/areas/electromecanica/MODULOS%20%20TERCERO/SEGURIDAD%20Y%20CONFORTABILIDAD/Guia%20N%20C2%BA%205%20Seguridad%20ABS.pdf> (Septiembre de 2011).
- [6] "Vehículo inteligente: Tecnologías". http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/technologies/index_es.htm (Septiembre 2011).
- [7] "Seguridad activa". http://www.seguridad-vial.net/sistemas_seguridad.asp?sist=1 (Septiembre 2011).
- [8] Artículo de la DGT: "Seguridad activa". <http://www.dgt.es/revista/num150/pages/seguridadactiva.html> (Septiembre de 2011).
- [9] "Técnicas del automóvil. Equipo eléctrico". José Manuel Alonso Pérez. Editorial Thomson-Paraninfo.2009.
- [10] "Análisis del funcionamiento del ESP". Centro Zaragoza.2008
- [11] "Control de tracción". Miriam Pérez Gómez. Mayo 2008
- [12] "Seguridad pasiva. Elementos básicos". <http://www.todomecanica.com/seguridad-pasiva-componentes-basicos.html> (Septiembre de 2011).

- [13] Artículo de la DGT: "ESTRUCTURA: El elemento de seguridad pasiva más importante".
<http://www.dgt.es/revista/archivo/pdf/num144-Dossier%20I-VIII.pdf> (Septiembre 2011).
- [14] "El habitáculo de seguridad". Centro Zaragoza. Abril 2008.
http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R5_A8.pdf (Septiembre 2011).
- [15] "Lesiones por cinturón de seguridad". Daniel Alfaro Basso. 2005.
<http://www.reeme.arizona.edu/materials/Lesiones%20por%20Cintur%C3%B3n%20de%20Seguridad.pdf> (Septiembre 2011).
- [16] "Introducción al airbag". Ing. Sup. José Carlos Abellán Rosende.
www.ica.es/publicaciones/anales_get.php?id=397
(Septiembre 2011).
- [17] "Crash test: luces y sombras".
<http://www.diariomotor.com/2008/06/15/crash-test-luces-y-sombras/> (Septiembre de 2011).
- [18] Artículo del RACE: "EuroNCAP: 10 años velando por la seguridad de los automovilistas".
http://www.race.es/opencms/opencms/system/galleries/webrace/downloads/informes_segvia/informe_2005_11_euroNCAP_10.pdf
(Septiembre de 2011).
- [19] "The Evolution of the Crash Test Dummy".
<http://www.autoevolution.com/news/the-evolution-of-the-crash-test-dummy-21066.html> (Octubre de 2011).
- [20] "European New Car Assessment Programme, EuroNCAP".
<http://www.euroncap.com> (Septiembre de 2011).
- [21] "Estructuras del vehículo". Tomás Gómez Morales. Ed. Paraninfo.
- [22] "Una introducción al método de los elementos finitos".
<http://www.ehu.es/~mepvaarf/rnupde/femelipticos.pdf>
(Septiembre de 2011).
- [23] "El método de los elementos finitos: Las bases" O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, editorial CIMNE, 5ª Edición, 2004.
- [24] "LS-DYNA Keyword User`s Manual, version 970". Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003.
- [25] Lawrence livermore national laboratory.
<https://www.llnl.gov/> (Septiembre 2011).
- [26] "The Abbreviated Injury Scale".
<http://www.tarn.ac.uk/content/downloads/72/coding.pdf>
(Septiembre 2011).
- [27] "Modelado de diferentes tipos de cinturones de seguridad y estudio de su efecto en caso de colisión frontal mediante LS-Dyna". Jaime Martín Pérez. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Septiembre 2010.

- [28] "Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera". David Illescas Pérez. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2009.
- [29] "Estudio del Efecto del Cinturón de Seguridad y del Airbag en el Ocupante de un Vehículo en Caso de Colisión". Manuel Moriche Guerrero. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Julio 2008.
- [30] "Fundamentos físicos y su aplicación en la reconstrucción de accidentes de tráfico".
<http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/MRATEExtracto.pdf> (Octubre 2011).
- [31] "Contact modeling in LS-Dyna".
<http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types> (Septiembre de 2011).
- [32] "Simulación de un choque lateral con *dummy* sin cinturón". Jesús Sánchez Aguilera. Proyecto de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2011